



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JUHANI PENTTILÄ

**HAVAITUN JA LASKENNALLISEN ROUDAN SYVYYDEN JA
ROUTANOUSUN VERTAILU RADALLA**

Diplomityö

Tarkastajat:

Professori Pauli Kolisoja

Professori Antti Nurmikolu

Tarkastajat ja aihe hyväksytty

Rakennetun ympäristön tiedekunta-
neuvoston kokouksessa

5. syyskuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

PENTTILÄ JUHANI: Havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden ja routanousun vertailu radalla

Diplomityö, 113 sivua, 42 liitesivua

Helmikuu 2013

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastajat: prof. Pauli Kolisoja ja prof. Antti Nurmikolu

Avainsanat: ratarakenne, routa, routaantuminen, routiminen, routanousukoe, roudan mallintaminen

Suomen rataverkon rakennekerrokset mitoitetaan routimattomiksi, jotta radan tasaisuusvaatimus täyttyy. Routivat radan rakennekerrokset ja routiva pohjamaa aiheuttavat haittaa radan rakenteelle. Tämä tutkimus käsittelee radan routaantumista ja routimista sekä niiden mallintamista laboratoriokokeiden perusteella.

Radan routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuudet havaitaan usein riittämättömiksi, jolloin routa tunkeutuu pohjamaahan aiheuttaen routanousuja sekä mahdollisesti raidegeometrian vääristymiä epätasaisen routanousun seurauksena. Radan routasuojaus perustuu riittäviin tuki- ja alusrakennekerrospaksuuksiin sekä routaeristeiden käyttöön. Routiminen edellyttää pakkasta, vettä ja routivaa maamateriaalia, joista jonkin puuttuessa routimista ei tapahdu.

Laboratoriossa ja radalla havaittavan routimisen yhteyden selvittämiseksi TTY:llä on kehitetty kenttämittaustajärjestelmä, jolla havainnoidaan roudan syvyyttä, radan routanousuja, ratarakenteen kosteutta ja ilman lämpötilaa. Mittaustulokset tallentuvat dataloggeriin ja ovat etäluettavissa GPRS-yhteydellä. Tutkimuksessa analysoitiin 14 roudan monitorointiaseman mittaustuloksia. Ilmatieteen laitokselta tilattiin säähavaintotiedot koekohteiden vuorokauden keskilämpötilasta, sademäärästä ja lumensyvydestä. Lämpötilatiedoista laskettiin talvien pakkasmäärät, joista arvioitiin laskennallisesti roudan syvyyksiä ja vertailtiin talvien ankaruuksia.

Tutkimukseen sisältyi laboratoriossa tehtäviä routanousukokeita kenttähavaintokohteiden tukikerros-, alusrakennekerros- ja pohjamaanäynteille. Routanousukokeella määriteltiin materiaalien routimisherkyys otollisissa routimisolosuhteissa. Tutkittavien näyttemateriaalien rakeisuudet ja vesipitoisuudet määritettiin. Ainoastaan kaksi tukikerrosnäytettä arvioitiin routimiskertoimen ja neljän vuorokauden jälkeisen routanousun perusteella käytännöllisesti routimattomaksi. Suurin neljän vuorokauden jälkeinen routanousu pohjamaanäynteissä oli 43,8 mm. Monet alusrakennekerrosnäytteet ja kaikkien havaintokohteiden pohjamaanäytteet olivat erittäin routivia.

Tuki- ja alusrakennekerrosnäytteiden hienoainespitoisuuden ja routanousukokeessa tapahtuneen routanousun välillä havaittiin selvä riippuvuus. Koekohteilla havaitun roudan syvyyden ja Stefanin kaavalla laskennallisesti määritetyn roudan syvyyden välillä havaittiin selkeää riippuvuutta. Pakkasmäärän perusteella laskettu roudan syvyys antaa hyvän arvion talven roudan syvyydestä. Koekohteilla havaitun ja laboratoriokokeiden perusteella laskettujen routanousujen välille ei havaittu selkeää riippuvuutta.

Kentällä tapahtuvan routimisen mallintaminen laboratoriokokeiden perusteella vaatii jatkotutkimuksia. Routimisen mallintaminen vaatii havaintokohteiden paikallisten routimis- ja ilmasto-olosuhteiden tarkempaa huomiointia.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

PENTTILÄ, JUHANI: A comparison of observed and calculated frost penetration depth and frost heave of track structures

Master of Science Thesis, 113 pages, 42 Appendix pages

February 2013

Major: Civil Engineering

Examiners: Professor Pauli Kolisoja and Professor Antti Nurmikolu

Keywords: frost, frost heave, frost action, frost research, frost heave test, frost modelling, track structure

This study focusses on the frost action on the railway track and its modelling in laboratory settings. The Finnish railway network structure has been designed with non-frost-susceptible structural layers in order to meet track smoothness requirements. Frost-susceptible layers of track structures cause structural damage to the track.

The thicknesses of the track's frost-susceptible structural layers are often insufficient which allows frost heave to occur possible leading to distorted track geometry. Cold weather, water and frost-susceptible soil material, are required for frost action to occur. Therefore, sufficient ballast- and sub-ballast layers with insulation layers, if necessary, have been widely used to protect track structures from frost action.

To verify the results of frost action tests conducted in laboratory, TUT has developed a field measurement system to measure frost penetration depth, frost heaving of track, moisture content of track structure, and air temperature. The measurement results stored in a data logger can be read remotely via a GPRS connection. Data collected from 14 frost monitoring stations was analysed in this study. On-site meteorological data the daily average temperature, the amount of precipitation and snow depth ordered from the Finnish Meteorological Institute were also used in this study. The severities of winters were evaluated based on air freezing indices and frost penetration depths.

Laboratory frost heave tests on ballast, sub-ballast and subsoil samples from field sites were used to determine frost heave and the frost-susceptibility of materials in conditions conducive to frost action. The grain sizes and water content of materials were also measured. Only two ballast layer samples were found to be practically non-frost-susceptible based on the frost heave coefficient and amount of frost heave after four days. The maximum frost heave after a four-day freeze was 43.8 mm. Many of the sub-ballast samples and all of the subsoil samples proved to be frost-susceptible.

The correlation between frost susceptibility and fines content of ballast and sub-ballast samples fines content was clear. The observed frost penetration depth at field sites and the one calculated using Stefan's formula based on the air freezing index also correlated closely. The calculated frost penetration depth based on the air freezing index gives a good estimate of frost penetration depth. No clear correlation between observed frost heave at field sites and calculated frost heave based on laboratory frost heave tests was found.

Modelling of frost heave in the field by laboratory tests needs to be studied further. Modelling of frost action requires more accurate observations about actual frost action and climatic conditions in the field.

ALKUSANAT

Diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennetun ympäristön tiedekunnassa Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä. Työ kuului Liikenneviraston rahoittamaan TERA - Elinkaaritehokas rata - tutkimuskokonaisuuteen.

Diplomityötä aloitellessani lähtötietoni olivat vähäiset routailmiöstä ja kyseenalaistin hieman omia taitojani ja tietojani suoriutua tästä opinnäytetyön aiheesta, mutta tekemällä oppii ja työ saatiin lopulta kansiin. Työn aikana kiinnostus maaperään on kasvanut niin paljon, että päätin opiskella vielä lisää ja vaihtaa pääaineen liikenne- ja kuljetusjärjestelmistä yhdyskuntarakentamiseen.

Haluan kiittää työn ohjaajia professori Antti Nurmikolua sekä diplomi-insinööri Kari Pylkkästä. Heidän opastuksellaan työ kulki kuin juna raiteillaan kohti oikeaa päämäärää. Kiitokset diplomi-insinööri Heikki Luomalalle avusta mittausaineiston kanssa ja laboratoriimestari Marko Hapolle avusta routanousukokeiden kanssa. Kiitokset työn tarkastajalle professori Pauli Kolisojalle. Erityiskiitos kuuluu routaguru Spencer Guthrielle, joka vietti kaksi kuukautta TTY:llä auttaen routaprojekteissa ja tuomalla uusia näkökulmia Maa- ja pohjarakenteiden yksikön tutkimustyöhön. Kunniainnointi kuuluu myös Maa- ja pohjarakenteiden yksikön työilmapiirille ja työyhteisölle.

Lopuksi haluan kiittää ja kumartaa ystäviäni saamastani tuesta, seurasta ja mahdollisista opiskeluajasta. Erityisainnointi fuksiryhmällemme, jonka viikoittaiset saunat, harrastukset ja muut illanvietot ovat olleet monien viikkojen kohokohtia. Kotiväelle lämmin kiitos tuesta, kodista, opiskelujen mahdollistamisesta sekä pienestä asti painotetusta opintojen merkityksestä. Taas on yksi päämäärä saavutettu ja uudet haasteet odottavat.

Tampereella, 5.2.2013

Juhani Penttilä

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	8
1.1	Työn tausta	8
1.2	Työn tavoitteet	9
1.3	Työn sisältö	9
2	Ratarakenne ja sen routaantuminen	11
2.1	Radan rakenne ja rakenneosat	11
2.2	Ratarakenteen routaantuminen ja roudan syvyyteen vaikuttavat tekijät.....	13
2.2.1	Käsitteet.....	13
2.2.2	Routaantumismekanismi	14
2.2.3	Lämpötilan vaikutus routaantumiseen	15
2.2.4	Lumen vaikutus routaantumiseen	15
2.2.5	Maan ominaisuuksien vaikutus routaantumiseen.....	16
2.3	Routamitoitus ja routasuojauksen tavoite	18
2.3.1	Uusien ratojen routamitoitus	18
2.3.2	Olemassa olevien ratojen routasuojaus	20
3	Routiminen.....	22
3.1	Routismekanismi	22
3.1.1	Routimisen edellytykset	22
3.1.2	Routimisen aiheuttama routanousu	22
3.1.3	In-situ routanousu	23
3.1.4	Maamateriaalin ja veden yhteistoiminta routimisilmiössä.....	24
3.1.5	Veden kulkeutuminen jäätymisvyöhykkeeseen routimisilmiössä	25
3.1.6	Routimisen aiheuttama routanousupaine ja kuormitus	26
3.2	Routivuuden luokittelu ja routimisolosuhteet	27
3.2.1	Routivuuden luokittelumenetelmät	27
3.2.2	Routivuuden luokittelu indeksiominaisuuksien perusteella.....	28
3.2.3	Routimisen luokittelu routanousukokeiden perusteella	28
3.2.4	Maan vesiolosuhteiden vaikutus routimiseen	30
3.2.5	Routimisen luokittelu in-situ/ kenttätutkimusten perusteella.....	30
3.3	Roudan sulaminen.....	31
3.3.1	Roudan sulamispainuma	31
3.3.2	Roudan sulamispehmeneminen.....	31
3.4	Lähtötiedot roudan syvyyden ja routanousun laskentaan	32
3.4.1	Routaantumisen ja routimisen laskentamallit	32
3.4.2	Ratarakenteen roudan syvyyden laskentamalli	33
3.4.3	Segregaatiopotentiaali ja routanousun laskentamalli	34
3.4.4	Routamittaukset	35
3.4.5	Laskentamallien olosuhde- ja materiaalitiedot.....	36
4	Kokeellinen routatutkimus radalla	37
4.1	Tutkimuskohteet.....	37

4.2	Kenttämittaukset ja ilmastotiedot.....	40
4.3	Näytteet ja näytteenotto.....	43
4.4	Routanousukoe.....	44
4.4.1	Routanousukoe-kappaleiden valmistus	44
4.4.2	Routanousukoejärjestely	45
5	Tutkimustulokset.....	48
5.1	Kenttämittaukset	48
5.1.1	Koekohteiden roudan maksimisyvytydet talvittain.....	48
5.1.2	Koekohteiden roudan syvyys-/routanousukuvaajat	49
5.1.3	Koekohteiden lämpötilaprofiilit	63
5.1.4	Koekohteiden vesipitoisuudet	63
5.1.5	Koekohteiden ilmastotiedot	73
5.2	Laboratoriokokeet	78
5.2.1	Näytteiden rakeisuudet.....	78
5.2.2	Routanousukoe.....	80
5.2.3	Routanousukoe-kappaleiden vesipitoisuudet	85
6	Tulosten analysointi	88
6.1	Hienoainespitoisuuden vaikutus routivuuteen	88
6.2	Havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden vertailu.....	91
6.3	Havaitun ja laskennallisen routanousun vertailu.....	99
7	Päätelmät ja jatkotutkimussuosituksset	106
7.1	Radan rakennekerrosten routaantuminen ja routiminen	106
7.2	Roudan syvyyden ja routimisen mallintaminen.....	107
7.3	Jatkotutkimussuosituksset	108
	Lähdeluettelo.....	110
	Liitteet	

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Latinalaiset kirjaimet

a	Korjauskerroin pakkasmäärälle
F	Pakkasmäärä
F_i	Tilastollisesti kerran i vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä
F_{red}	Korjauskertoimella korjattu pakkasmäärä
gradT	Jäätyneen maakerroksen keskimääräinen lämpötilagradientti
gradT_f	Lämpötilagradientti routarajalla
h_{24h}	Yhden vuorokauden jälkeinen routanousu
h_{96h}	Neljän vuorokauden jälkeinen routanousu
Δh	Routanousun lisäys tietyllä aikavälillä Δt
H_s	Routanousu
Δt	Aikaväli
k	Maalajikerroin
L	Jäätymislämpö
SP₀	Routimiskerroin
t	Pakkaskauden pituus
T_s	Maanpinnan lämpötila
v	Routanousunopeus
z	Roudan syvyys

Kreikkalaiset kirjaimet

λ	Lämmönjohtavuus
ψ	Maan lämpökapasiteettia huomioiva korjauskerroin

Lyhenteet ja nimitykset

GPRS	General Packet Radio Service
EPS	Muottipaisutettu polystyreeni
ISSMFE	International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering
RATO	Ratatekniset ohjeet
TERA	Tutkimusohjelma, Elinkaaritehokas rata
TUT	Tampere University of Technology
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
XPS	Suulakepuristettu polystyreeni

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Routimisen vaikutus Suomen rataverkon elinkaarikustannuksiin on suuri. Vuosittain joidenkin rataosuuksien liikennöintinopeuksia joudutaan rajoittamaan tai tekemään radan kunnossapitotöitä routimisilmiön aiheuttamien raidegeometriapoikkeamien takia. Poikkeamat ovat seurausta ratarakenteessa olevan routimisherkan maamateriaalin jäätymisestä talven pakkaskauden aikana ja roudan sulamisesta keväällä. Keväisin rata saattaa menettää kantavuuttaan radan sulamispehmenemisen takia ja vaurioitua rataan kohdistuvan liikennekuormituksen seurauksena.

Radan rakennekerrokset mitoitetaan ja rakennetaan voimassa olevien ohjeiden mukaan routimattomiksi tilastollisesti kerran 50 vuodessa kertyvän pakkasmäärän varalle. Ratarakenteen alusrakenne suunnitellaan 100 vuoden ja tukikerros yleisesti 40 vuoden käyttöiälle. Monet olemassa olevat ratarakenteet eivät täytä tämänhetkisiä rakennavaatimuksia. Ratarakenteelle ja sen tasaisuudelle on asetettu tiukat vaatimukset ratojen liikennöintinopeuksien kasvaessa. Ratarakenteen tuki- ja alusrakennekerros rakennetaan voimassa olevien ohjeiden mukaan routimattomista kiviainesmateriaaleista, mutta olemassa olevilla rataosuuksilla esiintyy myös routivia kiviainesmateriaaleja. Tärkeimpien rataosuuksien tukikerros koostuu tiukat laatuvaatimukset täyttävästä routimattomasta raidesepelistä. Alusrakennekerroksessa käytetään routimatonta hiekkaa, soraa tai murskattua kalliokiviainesta.

Ratojen routimisherkkyyttä on tutkittu aiemmin Nurmikolun (2004) kirjallisuus selvityksessä. Selvityksessä todettiin materiaalin routimisherkkyyden riippuvan materiaalin hienonemisesta radan käyttöiän aikana. Routimisherkkyyden arvioinnissa tärkeimmiksi tekijöiksi on havaittu materiaalin sisältämä hienoaines ja sen laatu. Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienonemis- ja routimisherkkyyys tutkimuksessa (Nurmikolu 2006) havaittiin materiaalien rapautuneisuuden vaikuttavan routimisherkkyyteen. Ratarakenteen alusrakennemateriaalien routivuutta on tutkittu (Saarinen 2008) ja havaittu, että Suomen rataverkolla on routahaittoja, jotka johtuvat routivasta alusrakennemateriaalista. Rakennekerrosmateriaalien routivuutta näytteiden ja laboratoriossa tehtävien routanousukokeiden avulla on tutkittu (Nurmikolu 2009) ja havaittu tarve kehittää laboratoriossa mitattujen materiaalien routivuusluokitusten soveltamisesta kenttäolosuhteissa tapahtuvan routimisen arviointiin. Laboratoriossa tehtävien materiaalitutkimusten ja kentältä saatavien monitorointihavaintojen yhdistettyä tarkistelua jatkettiin routimisherkkyytstudkimuksessa (Hietala et al. 2010). Tässä työssä käytettävät rataverkon koekohteiden havaintotiedot perustuvat roudanmonitorointiasemilta kerättyihin usean vuoden tiedonkeruutuloksiin (Luomala 2010).

1.2 Työn tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on perehtyä laboratoriossa havaitun ratarakennemateriaalin routimisherkkyyden ja kentällä havaitun routimisen yhteyden mallintamiseen. Tutkimuksessa vertaillaan laboratoriossa havaittua routimista kenttämittauksissa havaittuun routimiseen. Tutkimuksen tuloksena pyritään luomaan Suomen rataverkon olosuhteisiin yksinkertainen matemaattinen routimismalli. Routimismallin tavoitteena on tarkastella radan rakennekerros- ja pohjamaamateriaalien selittävyyttä radan routimisen aiheuttajana ja sitä, miten paljon rataosuuksien paikalliset olosuhteet vaikuttavat radan routimiseen. Routimismalli pyrkii ennustamaan kentällä vallitsevissa olosuhteissa tapahtuvaa routimista laboratoriossa tehtävien routanousukokeiden perusteella. Laboratoriossa tehtävissä routanousukokeissa arvioidaan maamateriaalien routivuutta maalajiominaisuutena radan rakenneosittain. Koekohteiden pohjamaa-, alusrakennekerros- ja tukikerrosmateriaaleista tehdään routanousukoe, jolloin voidaan selvittää routiva rakennekerros ja sen materiaali.

Routakokeen näyttemateriaaleille järjestetään esteetön lisäveden saanti ja muut routimistekijät. Routimisolosuhteista luodaan mahdollisimman otolliset, jotta saadaan selville materiaalin ideaalinen routimisherkkyyks. Kentällä routimista voivat rajoittaa radan rakenteessa vallitsevat olosuhteet, kuten tehokas ratarakenteen kuivatus. Kentällä routimattomaksi havaittu maamateriaali voi routia laboratoriokokeissa, jos kentällä vallitsevat olosuhteet eivät ole routimiselle otolliset. Laboratoriossa routimattomaksi havaittu materiaali ei roudi kentällä maalajiominaisuuksiensa perusteella milloinkaan. Routivaksi havaittu maamateriaali routii, jos kentällä vallitsevat veden saanti ja muut olosuhteet sen sallivat.

Rakenteen parantamisen suunnitteluvaiheessa tehtävät pohjamaa-, alusrakenne- ja tukikerrosmateriaalien routivuuskokeet paljastavat olemassa olevan ratarakenteen routimisherkkyyden ja mahdollisen routivan kerroksen. Ratarakennemateriaalien routanousukokeiden perusteella voidaan arvioida ratarakenteen parantamistoimenpiteiden tarpeellisuutta ja parantamistoimenpiteet voidaan kohdistaa täsmällisemmin ratarakenteen oikeaan kohtaan oikeassa laajuudessa.

1.3 Työn sisältö

Luvuissa 2-3 esitetyssä työn teoriaosuudessa on käsitelty perusteet radan rakennekerroksista ja sen routamitoituksesta. Työn aluksi luvussa 2 käsitellään routaantumisen perusmekanismi ja siihen vaikuttavat tekijät. Työn ydin käsittelee ratarakenteen routimista luvussa 3. Ratarakenteen routimisilmiöstä on tutkittu routimisen perusmekanismia ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Luvussa 3.2. käsitellään routimisen luokittelu- ja arviointitavat. Routimisen mallintamistapojen perusteita käsitellään luvussa 3.4.

Luvussa 4 on esitetty tutkimuksen kokeelliseen osuuteen sisältyvät roudan monitorointikohteiden rakennekerros- ja pohjamaanäytteiden rakeisuuden määritykset ja routanousukokeet. Neljän Tornion kohteen materiaalinäytteiden routanousukokeet oli tehty

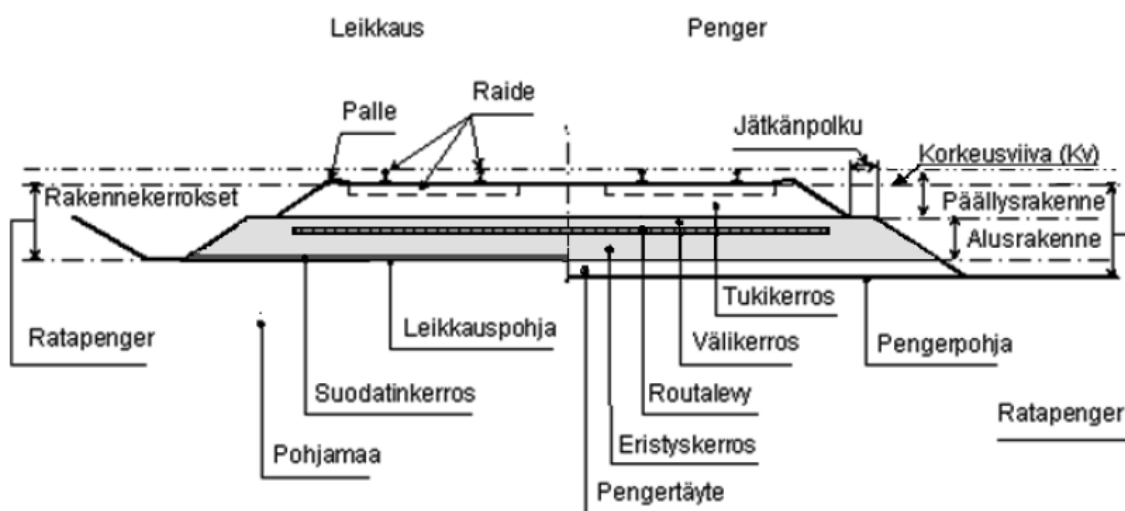
aiemman projektin yhteydessä, mutta myös niiden kokeiden tuloksia hyödynnettiin aineistona routanousun mallintamisessa. Tutkimuskohteille oli asennettuna roudan monitorointilaitteisto, jolla kerättiin radan rakennekerrosten lämpötila-, kosteus- ja ratapölkyn korkeustietoja ajanhetkittäin. Näytteenotto- ja monitorointikohteita oli kattavasti koko Suomen rataverkolla. Tutkimuskohteet on esitelty luvussa 4.1. Tutkimuskohteiden sijaintipaikat olivat Karkku, Kitee, Kuopio, Liminka, Mäntsälä, Paltamo, Varkaus, Viiala ja kuusi Tornio-Kolari rataosan kohdetta. Routatietoja oli kerätty osalla kohteista vuodesta 2008 alkaen ja uusimmat monitorointilaitteistot oli asennettu vuonna 2010. Kerättyjen tietojen avulla ratarakenteesta luotiin lämpötilaprofiileja ja selvitettiin roudan tunkeutumissyvyys ja sulaminen sekä ratapölkyn routanousu ja sulamispainuminen.

Tutkimuksen tulokset on esitetty luvussa 5. Laboratoriokokeista saadut tulokset ja kenttähavainnot analysoitiin kootusti. Tuloksista tehtiin yhteenvetotaulukko, johon oli kerätty kaikki materiaalitiedot, kokeiden tulokset, mittaushavainnot ja olosuhdetekijät. Tutkimustulosten analysointi on esitetty luvussa 6. Tulosten ja havaintojen perusteella tutkittiin korrelaatioita laboratoriokokeiden ja kenttähavaintotietojen välillä. Eri-tyisesti tarkasteltiin kentällä havaittua routanousua ja sen riippuvuutta rakennemateriaalien routimiskertoimista.

2 RATARAKENNE JA SEN ROUTAANTUMINEN

2.1 Radan rakenne ja rakenneosat

Radan rakennekerrokset jaetaan alusrakenteeseen ja päällysrakenteeseen. Päällysrakenteeseen kuuluvat tukikerros ja raiteet. Alusrakenteeseen kuuluvat väli- ja eristyskerros sekä mahdollisesti suodatinkerros. Radan rakenne ja rakenneosat on esitetty kuvassa 2.1. Ratarakenteen alusrakennekerros mitoitetaan 100 vuoden ja tukikerros 40 vuoden käyttöikävaatimukselle. Ratarakenteen paksuus määräytyy routamitoituksessa alusrakenneluokan perusteella. Alusrakenneluokka määräytyy henkilö- tai tavaraliikenteen vaatimusten perusteella, joista korkeamman vaatimustason omaava liikennetyyppi on määräävä. Radan alusrakenneluokat on esitetty taulukossa 2.1. (Ratahallintokeskus 2008)



Kuva 2.1. Radan rakenne ja rakenneosat (Ratahallintokeskus 2008).

Taulukko 2.1. Radan alusrakenneluokat (Ratahallintokeskus 2008).

Alusrakenneluokka	Henkilöliikenteen suurin sallittu nopeus, V [km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 225 kN akselipainolla, V [km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 250 kN akselipainolla, V [km/h]
0	≤ 50	≤ 40	≤ 40
1	≤ 120	≤ 100	≤ 60
2	≤ 200	≤ 100	≤ 80
3	≤ 250	≤ 120	≤ 100
4	> 250	> 120	> 100

Tukikerros

Tukikerroksen tehtävänä on pitää radan raiteet oikeassa korkeus- sekä kaltevuusasemassa ja -asennossa. Tukikerros jakaa raiteelle kohdistuvia kuormia alusrakenteelle ja pohjamaalle. Tukikerroksen täytyy muodostaa tukeva ja kantava alusta raiteille. Tukikerrokselta vaaditaan riittävän alhaista sähkönjohtavuutta ja tehokasta kuivatusta. Tukikerroksen mitat määräytyvät nopeuden, kiskojen pituuden, tukikerrosmateriaalien ja rata-pölkkyjen tyypin perusteella. Tyypillinen tukikerroksen paksuus on 550 mm. Tukikerrosmateriaali on raidesepeli tai vähäliikenteisillä radoilla raidesora. Tyypillisesti Suomessa käytettävän raidesepelin rakeisuus on 31,5–63 mm. Tukikerroksessa käytettävälle materiaalille on asetettu rakeisuusjakauma-, muotoarvo- ja lujuusvaatimuksia. (Ratahallintokeskus 2002)

Välikerros

Välikerroksen tehtävänä on muodostaa tasainen ja kantava pohja tukikerrokselle, estää eristys- ja tukikerrosta sekoittumasta, lisätä kantavuutta ja ehkäistä routahaittoja. Välikerros on vettä läpäisevä kerros. Välikerroksessa käytetään routimatonta hiekkaa, soraa tai kalliomursketta. Välikerroksen tyypillinen paksuus on 300 mm. (Ratahallintokeskus 2008)

Eristyskerros

Eristyskerroksen tehtävänä on jakaa kuormia rakenteen alemmille kerroksille, maa- tai kalliopohjalle. Eristyskerros muodostaa tasaisen ja kantavan alustan välikerrokselle. Eristyskerros pyrkii estämään tai vähentämään alla olevien maakerrosten aiheuttamia muodonmuutoksia ja pohjamaan routimista. Eristyskerros estää pohjamaata sekoittumasta ylempiin rakennekerroksiin ja estää kapillaarista vedennousua. Eristyskerroksessa käytetään routimattomia materiaaleja. Eristyskerroksen paksuus vaihtelee kohteesta riippuen muutamasta sadasta millimetristä noin kahteen metriin. (Ratahallintokeskus 2008)

Routalevy

Ratarakenteeseen voidaan myös lisätä routalevyjä estämään tai hidastamaan roudan etenemistä rakennekerroksissa, jotta rakennekerrosten alapuolinen pengeri tai pohjamaa ei routaannu. Routalevyjä käytetään, kun radan rakennekerrosten yhteispaksuus ei riitä estämään roudan tunkeutumista routivaan maamateriaaliin. Radalla käytetään suulakepuristettuja polystyreenilevyjä eli XPS-levyjä routaeristeinä niiden hyvän kuormituksen kestokyvyn ja alhaisen lämmönjohtavuuden takia. Ensisijainen tapa on korvata routivat maamateriaalit routimattomilla ja routalevyjen käyttö on toissijainen ratkaisu. (Ratahallintokeskus 2008)

Suodatinkerros

Suodatinkerroksen tehtävänä on estää rakennekerrosmateriaalien sekoittuminen ja lisätä rakenteen routimatonta paksuutta. Suodatinkerroksen tarve arvioidaan eristyskerroksen ja pohjamaan rakeisuuden perusteella. Suodatinkerroksen materiaalin pitää olla routimatonta. (Ratahallintokeskus 2008)

Pengertäyte

Ratapenger tarkoittaa radan rakennekerroksia ja mahdollista pengertäytettä. Pengertäytteen tehtävä on tasoittaa maanpinnan luonnollisia korkeusvaihteluja siten, että rakennekerrokset voidaan rakentaa sen päälle. Pengertäytteen täytyy tarjota tasalaatuinen ja ominaisuuksiltaan luonnonmaapohjaa vastaava alusta ratarakenteille. (Kolisoja 2007)

Pohjamaa

Pohjamaa tarkoittaa ratapenkereen alla olevaa luonnontilaista tai mahdollisesti lujitettua maata. Pohjamaan ominaisuudet ja tyyppi riippuvat alueesta ja pohjamaan maalajeista. Pohjamaan ominaisuudet voidaan selvittää kairauksin ja laboratoriokokein. Pohjamaan tehtävänä on kantaa ylempien rakennekerrosten ja liikennekuormien aiheuttamat rasitukset. Pohjamaan laatu vaikuttaa ratapenkereen stabiliteettiin, painumiin ja painumeroihin. (Ratahallintokeskus 2008)

2.2 Ratarakenteen routaantuminen ja roudan syvyyteen vaikuttavat tekijät

2.2.1 Käsitteet

Seuraavassa on kuvattu routaantumiseen ja routimiseen liittyviä käsitteitä.

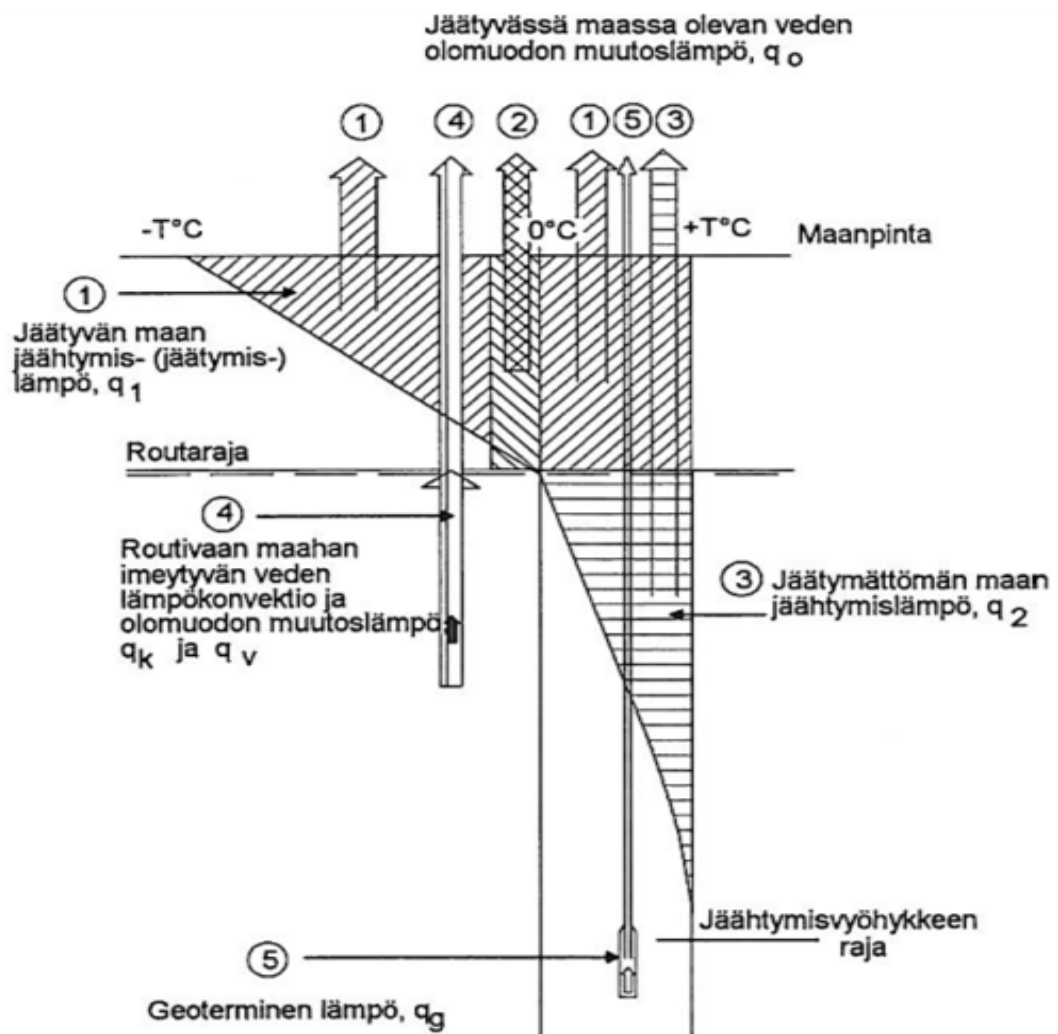
Routaantuminen	Maan jäätymistä, jossa jäätyminen etenee syvemmälle maaperään. Maa routaantuu, kun maaperän huokosvesi jäätyy. Kaikki maalajit routaantuvat, mutta vain osa routii.
Routiminen	Maan jäätyessä sen tilavuus kasvaa ja aiheuttaa routanousua maassa.
Routanousu	Maanpinnan pystyliikettä routimisvaiheessa.
Sulamispainuminen	Maanpinnan pystyliikettä roudan sulamisvaiheessa.
Pakkasmäärä	Pakkaskauden vuorokausien tai tuntien keskilämpötilojen summa.

Pakkaskausi /pakkasaika Ajanjakso, joka alkaa, kun vuorokauden keskilämpötila laskee alle 0 asteen eivätkä myöhemmät plus-asteiset päivät vie pakkasmäärää nolaa. Pakkaskausi päättyy, kun ilman lämpötila nousee pysyvästi keväällä nollan yläpuolelle.

Routaraja Jäätynneen ja sulan maan raja eli 0-asteen isotermin sijainti maassa.

2.2.2 Routaantumismekanismi

Routaantuminen kuvaa maassa olevan huokosveden jäätyksen seurauksena tapahtuvaa maan kovettumista. Routaantumisessa maan geotekniset ominaisuudet muuttuvat, erityisesti maan lujuus kasvaa. Routaantuminen alkaa, kun ilman lämpötila laskee alle 0 celsiusasteen maanpinnalla, jolloin lämpimämmästä maaperästä kylmempään ilmaan virtaavan lämpöenergian määrä kasvaa (Ehrola 1996). Maaperän jäätymisprosessia ja maaperästä poistuvia lämpömääriä on havainnollistettu kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Maaperästä poistuva lämpömäärä maan jäätymässä (Ehrola 1996).

2.2.3 Lämpötilan vaikutus routaantumiseen

Lämpötila on tärkein maan routaantumiseen vaikuttava tekijä. Ilman lämpötila vaikuttaa pakkaskauden keskilämpötilojen summaan eli pakkasmäärään. Pakkasmäärän avulla voidaan arvioida lämpötilan vaikutusta routaantumiseen. Roudan syvyys kasvaa pakkaskauden aikana pakkasmäärän kasvaessa ja routa alkaa vastaavasti sulaa, kun vuorokauden keskilämpötila nousee keväällä yli nollan celsiusasteen. Lumettomilla ja kasvi- peitteettömillä alueilla roudan syvyys riippuu lähes ainoastaan pakkasmäärästä ja maa- materiaalin vesipitoisuudesta. Roudan syvyyden ja pakkasmäärän suhde on epälineaarinen. Roudan syvyys kasvaa suurella pakkasmäärällä ja roudan syvyydellä suhteessa vähemmän kuin pienellä pakkasmäärällä ja roudan syvyydellä, koska roudan syvyyden kasvaessa jäätymisvyöhykkeen päällä olevat maakerrokset hidastavat lämmön vapautumista ja siten maan jäätymistä. Ilmiö tunnetaan maan eristevaikutuksena. (Soveri ja Varjo 1977)

Puhdas huokosvesi jäätyy, kun lämpötila laskee 0 celsiusasteeseen. Käytännössä maassa oleva vesi jäätyy hieman 0 celsiusastetta alemmassa lämpötilassa epäpuhtaan ja hienorakeisen materiaalin takia. Mitä epäpuhtaampaa ja hienorakeisempaa materiaali on, sitä alempi on sen jäätympiste. (Kujala 1990) Lämpöä vapautuu erityisesti veden olomuodonmuutoslämpönä, jäätyvän maan jäähtymislämpönä ja routarajan alapuolisen jäätymättömän maan jäähtymislämpönä. Maan ja ilman välisen lämpötilaeron kasvaessa lämpövirtaus maasta ilmaan nopeutuu. Lämpöenergia kulkee maassa johtumalla kohti maan ja ilman rajapintaa. Johtuminen noudattaa Fourierin lakia lämmönjohtumiselle, jossa lämpö siirtyy aina korkeammasta matalampaan lämpötilaan. (Ehrola 1996)

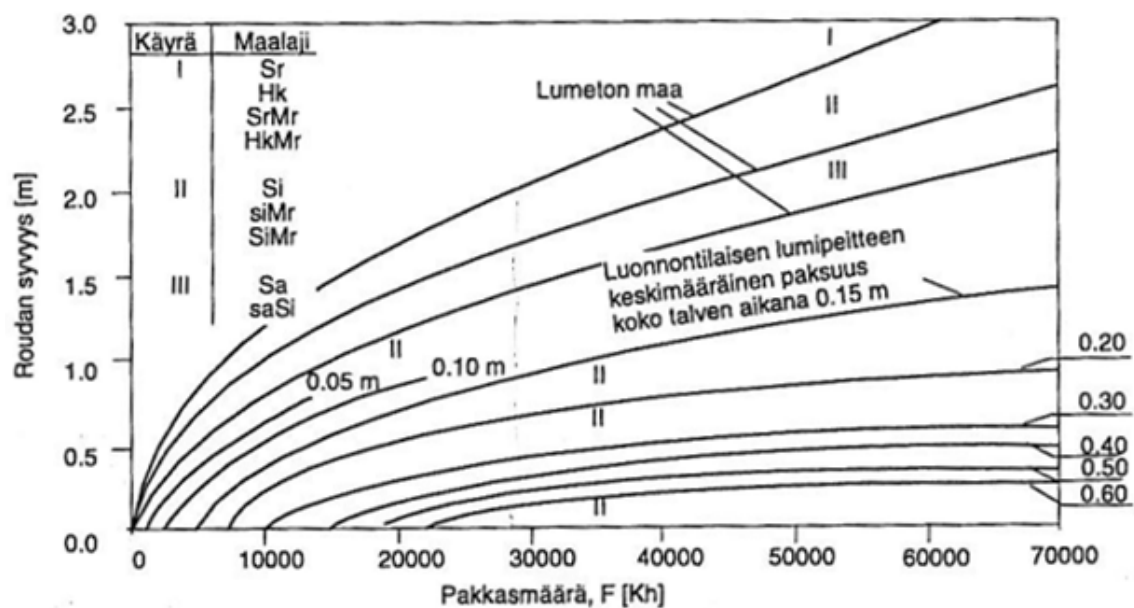
Vuotuinen lämpötilavaihtelu päättyy yleensä 10–15 metrin syvyydelle ja tällä syvyydellä oleva lämpötila on lähellä paikkakunnan ilman vuotuista keskilämpötilaa. Ehrola (1974) on havainnoinut lämpötilojen jakautumista tierakenteessa havaintojen avulla ja huomannut vuotuisen lämpötilavaihtelun vähenevän huomattavasti viiden metrin syvyydellä tierakenteessa. Vuoden keskilämpötila vaikuttaa roudan syvyyteen, koska lämpimänä vuonna maahan on varastoitunut enemmän lämpöenergiaa, jonka luovuttaminen maasta ilmaan vaatii suuremman pakkasmäärän. (Ehrola 1996)

Routaantumisen voimakkuutta arvioidaan usein ainoastaan ilmaston vuosittaisen pakkasmäärän perusteella, mutta paikkakohtaisilla ilmastotekijöillä on suuri vaikutus routaantumiseen. Ilmastotekijöitä ovat pakkasmäärä, pakkaskauden pituus, maan jäätymisprosessissa vapautuvan maalämmön suuruus ja lämpötilagradientti. Lämpötilagradientti kuvaa lämpötilan muutosta syvyyden suhteen. (Ehrola 1996)

2.2.4 Lumen vaikutus routaantumiseen

Roudan syvyyteen vaikuttaa lumipeitteen muodostumisajankohta ja lumipeitteen paksuus. Lumipeite hidastaa roudan muodostumista syksyllä ja sulamista keväällä. Paksu lumipeite on tehokas eriste routaantumislle, koska lumella on huono lämmönjohtokyky. Lumen tiheys vaikuttaa lumen eristävyyteen, pehmeä paljon ilmaa sisältävä lumi eristää paremmin kuin kova vähän ilmaa sisältävä lumi. Keväällä lumipeitteen tiheys

kasvaa, jolloin sen eristevaikutus pienenee (Soveri ja Varjo 1977). Lumipeitteen alla lämpötilan vaihtelut ovat huomattavasti pienemmät kuin ilman lämpötilan vaihtelut lumipeitteen päällä. Lumipeitteen alla pakkasmäärä on huomattavasti pienempi kuin ilman massa lumipeitteen päällä. Jos kovat pakkaset tulevat ennen pysyvää lumipeitettä tai lumikerros on ohut, routa tunkeutuu syvälle. Soverin ja Varjon (1977) tutkimuksen mukaan lumen peittämällä aukeilla mailla ja metsissä roudan syvyys on keskimäärin vain 20–50 % vastaavilta lumettomilta alueilta. Kuvassa 2.3 on esitetty lumipeitteen vaikutusta roudan syvyyteen Soverin ja Varjon tekemien kenttähavaintojen perusteella. (Soveri ja Varjo 1977)



Kuva 2.3. Eri maalajiryhmien roudan syvyyden ja pakkasmäärän riippuvuus sekä luonnontilaisen lumipeitteen vaikutus roudan syvyyteen kenttähavaintojen perusteella. (Soveri ja Varjo 1977).

2.2.5 Maan ominaisuuksien vaikutus routaantumiseen

Eri maalajiryhmät routaantuvat ja routivat eri tavoin. Suurin ero johtuu maalajien kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtokyvyn eroista. Karkeiden maalajien kosteuspitoisuus on huomattavasti pienempi kuin hienorakeisten maalajien, koska ne eivät pysty sitomaan vettä pinnalleen yhtä paljon kuin hienorakeiset maalajit. Syksyn sateiden määrä vaikuttaa huomattavasti maankosteuteen ennen roudan muodostumista. (Soveri ja Varjo 1977)

Maaperän lämmönjohtokyky vaikuttaa merkittävästi sen routaantumiseen. Lämpö voi siirtyä maaperässä kolmella tavalla: johtumalla, säteilemällä tai konvektiona. Johtumalla lämpö etenee maarakeiden, rakeiden sidosvesien tai huokosilman kautta. Lämpösäteily etenee huokosten läpi, ja konvektiossa lämpö etenee nesteinä tai höyrynä olevan veden tai ilman kuljettamana. Veden tai jään kyllästävässä routimattomassa ratarakenteen materiaalissa pääasiallinen lämmönkuljetusmekanismi on johtuminen. Routivassa maassa lämpö voi kulkea myös konvektiona veden virtausten mukana. Kuvassa 2.2 routivaan maahan imeytyvän veden lämpökonvektio on esitetty q_k :na. Maan

lämmönjohtavuus tarkoittaa lämpövuon ja lämpötilagradientin suhdetta. Maan hyvä lämmönjohtavuus nopeuttaa maan pintakerroksen jäähtymistä ja kasvattaa roudan syvyyttä. Lämmönjohtavuutta voidaan arvioida maalajiominaisuuksien perusteella tai se voidaan määrittää laboratorio- ja kenttäkokeiden perusteella. (Saarelainen 1990; Soveri ja Varjo 1977)

Maan lämmönjohtavuudessa tapahtuu muutos, kun lämpötila painuu 0 celsiusasteen alapuolelle ja vesi alkaa jäätyä, koska jään lämmönjohtavuus on lähes neljä kertaa suurempi kuin vedellä. (Aittomäki ja Saviharju 1975)

Maan lämpökapasiteetti tarkoittaa lämpömäärää, joka tarvitaan nostamaan massayksikön lämpötilaa yhdellä asteella (Kujala 1990). Maaperän lämpökapasiteetti (ominaislämpö) vaikuttaa roudan muodostumiseen. Maan lämpökapasiteetti muodostuu mineraaliaineksen, orgaanisen aineksen ja veden (jään) lämpökapasiteettien summasta. Maahan varastoituneen lämpömäärän johtuminen alemmista kerroksista kohti maan pintaa estää roudan muodostumisen kunnes lämpökapasiteetti on kulunut maanpinnan lämmittämiseen ja pinnan lämpötila laskee alle 0 asteen. Tällä perusteella maan lämpökapasiteetilla ja maan lämmönjohtavuudella on vastakkaiset vaikutukset maan routaantumiseen. Maan jäätyessä maassa oleva vesi luovuttaa runsaasti lämpöä, jota kutsutaan veden jäätyislämmöksi. Jäätyislämpö hidastaa maan jäähtymistä. (Tsytoich 1975)

Kaikki maan sisältämä vesi ei jäädy samassa lämpötilassa vaan jäätyminen tapahtuu laajalla lämpötilavälillä riippuen maalajiominaisuuksista. Osa maassa olevasta huokosvedestä on maapartikkeleiden sähköisen voimakentän vaikutuksen alaisena, jonka takia vedellä on alempi jäätyislämpötila. Hienorakeisten maalajien maapartikkeleiden ominaispinta-ala on suurempi, jolloin maalajilla on parempi kyky imeä enemmän vettä tiukasti partikkeleiden pinnalle. Suuremman partikkeleiden ominaispinta-alan takia hienorakeiset maalajit sitovat itseensä enemmän jäätyvätöntä huokosvettä kuin karkearakeiset maalajit. Hienorakeiset maalajit voivat sisältää jäätyvätöntä vettä vielä alle -20 asteen lämpötiloissa. (Johansen ja Frivik 1980)

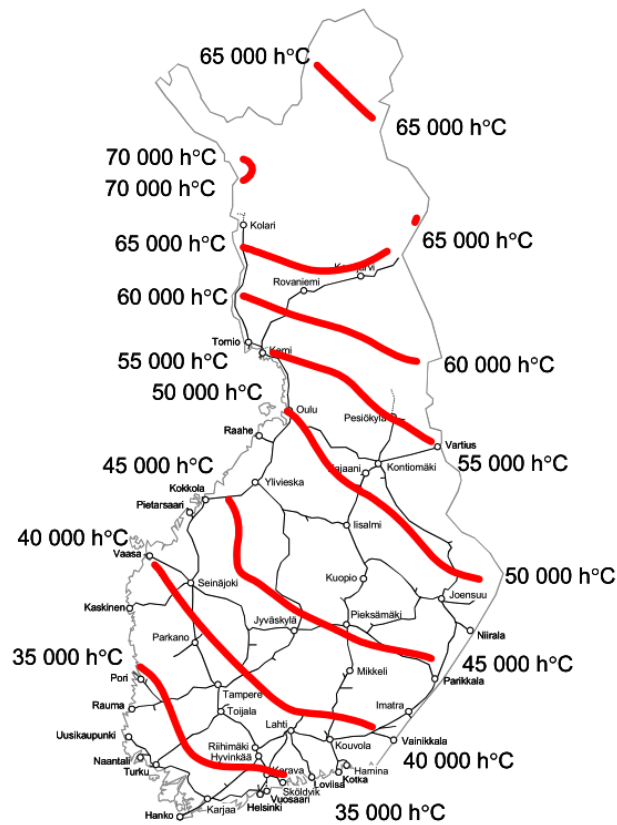
Maalajin tiiveys vaikuttaa lämmönjohtavuuteen ja lämpökapasiteettiin. Lämmönjohtavuus ja tilavuuslämpökapasiteetti kasvavat maan tilavuuspainon kasvaessa. Lämmönjohtavuus kasvaa suhteellisesti lämpökapasiteettia nopeammin, joten routa etenee tiiviissä maassa syvemmälle, koska tiivis maa luovuttaa tehokkaammin lämpöenergiaa. Karkearakeiset maalajit routaantuvat hienorakeisia maalajeja syvemmälle niiden alhaisemman vesipitoisuuden takia. Roudan syvyyteen vaikuttaa vähentävästi lämpiminä vuodenaikoina maahan varastoitunut maalämpö. Varastoituneen maalämmön suuruuteen vaikuttavat ilman lämpötilamuutokset ja maan lämmönjohtavuus. Maassa tapahtuvat lämpötilan muutokset tapahtuvat aina ilman lämpötilamuutoksia hitaammin. Muutokset hidastuvat ja tasaantuvat syvemmälle maahan mentäessä. (Soveri ja Varjo 1977)

2.3 Routamitoitus ja routasuojauksen tavoite

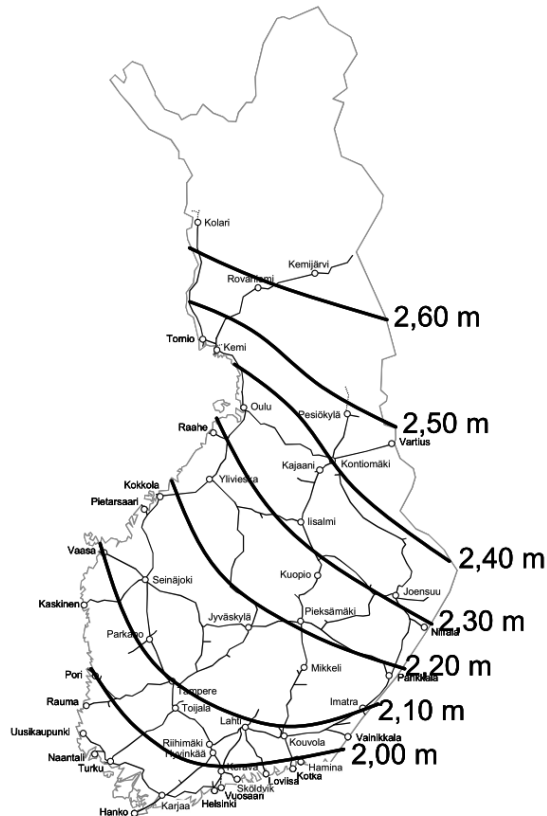
2.3.1 Uusien ratojen routamitoitus

Ratarakenteen routamitoitus perustuu roudan tunkeutumissyvyyden tuntemiseen. Ratarakenne mitoitetaan aina routimattomaksi eli routanousuja ei sallita. Radalle on asetettu korkea tasaisuusvaatimus. Vaatimusta tarkkaillaan arvioimalla tai mittaamalla radan epätasaisuuksia ja niiden toistuvuuksia. Routimattomuus on tärkeää radan tasaisuuden, turvallisuuden ja liikennöitävyyden takia. Suomessa ratarakenteiden mitoitus perustuu menetelmään, joka on yhdistetty menetelmä Watzingerin, Kindemin, Michelsenin ja Beskowin menetelmästä. Menetelmä on esitelty Ratarakenteen routasuojaus tutkimuksessa. (Nurmikolu ja Kolisoja 2002)

Routivan pohjamaan jäätyminen estetään riittävän paksulla eristyskerroksella. Todennäköinen rakenteen jäätymissyvyys lasketaan mitoituspakkasmäärällä, joka on kerran 5, 20 tai 50 vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä riippuen asetetusta alusrakenneluokasta. Suomen tärkeimmillä rataosilla käytetään kerran 50 vuodessa toistuvaa pakkasmäärää. Kuvassa 2.4 on esitetty Suomessa kerran 50 vuodessa tilastollisesti toistuva pakkasmäärä. Routiminen estetään ensisijaisesti käyttämällä routimattomia rakennekerrosmateriaaleja. Routaeristeenä käytetään XPS-routalevyjä. Uusilla routaeristämättömillä radoilla routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuuden on täytettävä tilastollisesti toistuvan pakkasmäärän asettamat vaatimukset. Kuvassa 2.5 on esitetty routimattomaksi suunnitellun radan rakennekerroksien kokonaispaksuusvaatimus vyöhykkeittäin Suomessa, kun mitoittavana pakkasmääränä käytetään kerran 50 vuodessa toistuvaa pakkasmäärää. (Ratahallintokeskus 2008)



Kuva 2.4. Kerran 50 vuodessa tilastollisesti toistuva pakkasmäärä ($h^{\circ}C$) (Ratahallintokeskus 2008).



Kuva 2.5. Routimattoman radan rakennekerrosten kokonaispaksuus (m) (Ratahallintokeskus 2008).

2.3.2 Olemassa olevien ratojen routasuojaus

Routivasta ratarakenteesta aiheutuu talvittain routavaurioita ja ongelmia Suomen rata-verkostolle. Yleisimmät routaongelmat ovat ratarakenteeseen, teknisiin epäjatkuvuuskohtiin tai ilmastollisiin syihin liittyviä ongelmia. Seuraavassa luettelossa on esitetty Suomen rataverkon yleisimmät routaongelmat jaoteltuna Roudan hallintaraportin mukaisesti (Liikennevirasto 2010). Kuvassa 2.6 on esitetty routatilanne toukokuussa 2011, jolloin routa aiheutti paljon rajoitteita rataverkolle. (Liikennevirasto 2010)

Ratarakenteen ongelmat

- Riittämättömät ratarakenteen kerrospaksuudet
- Maaleikkausten ja pengerten rajakohdat
- Routivan pohjamaan sekoittuminen rakennekerrokseen
- Tukikerroksen jauhaantuminen ja sen epäpuhtaudet
- Vanhat eristyskyvyn menettäneet routaeristeet
- Vaihtelevat pohjasuhteet
- Pohjavedenpinnan vaihtelut
- Kuivatusongelmat

Tekniset epäjatkuvuuskohdat

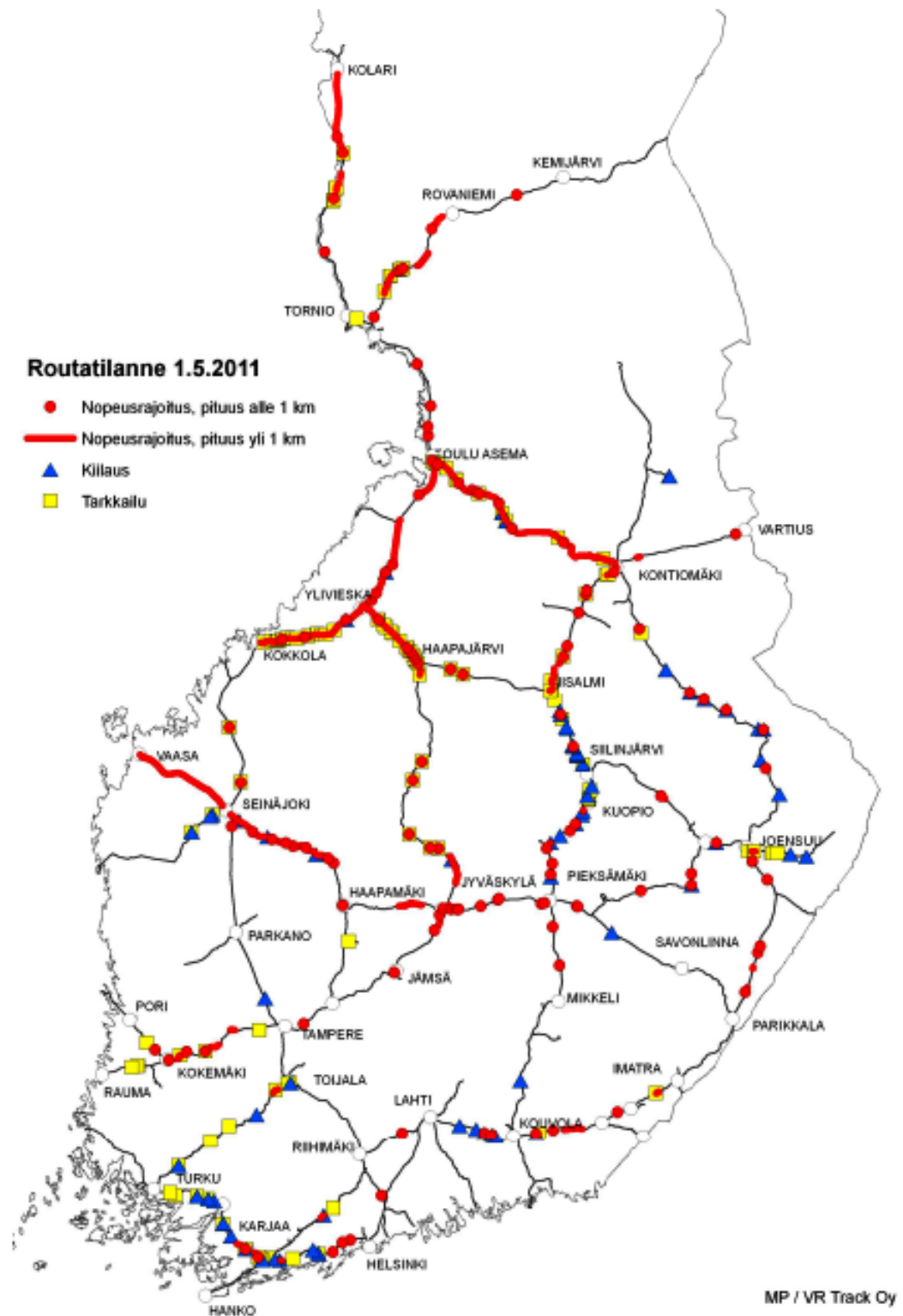
- Siltojen päät
- Ratarakenteessa olevien rumpujen kohdat
- Tasoristeys- ja vaihderakenteet

Ilmasto-olosuhteet ja tekijät

- Pakkasmäärä
- Syyssateet ennen pakkaskauden alkua

Olemassa olevien ratojen rakenne ei useinkaan vastaa luvussa 2.3.1 esitettyjä uusia mitoitusvaatimuksia ja siksi olemassa olevien ratojen routasuojausta parannetaan. Kunnostettaessa vanhaa rakennetta routasuojaus voidaan toteuttaa vaihtamalla routivat materiaalit routimattomiksi tai vaihtoehtoisesti käyttämällä routalevyjä routasuojaukseen. (Ratahallintokeskus 2008)

Routaeristeitä käytettäessä rakenne mitoitetaan määritettyjen routaeristeiden mitoituskäyrästä, mitoituspakkasmäärän ja vuotuisen ilman keskilämpötilan perusteella. Mitoittava pakkasmäärä määräytyy radan suunnitellun alusrakenneluokan mukaan. Alusrakenneluokat jaetaan viiteen vaatimustasoluokkaan 0-4, jotka määräytyvät radan liikennöintinopeuden mukaan. Alusrakenneluokan määräävät liikennöintinopeudet on esitetty taulukossa 2.1. (Ratahallintokeskus 2008)



Kuva 2.6. Roudan aiheuttamien nopeusrajoitusten, kiilausten ja tarkkailukohteiden määrä Suomen rataverkolla 1.5.2011, jolloin routarajoitukset olivat talvella 2010–2011 laajimmillaan (Liikennevirasto 2011).

3 ROUTIMINEN

3.1 Routismekanismi

3.1.1 Routimisen edellytykset

Routiminen edellyttää kolmea tekijää, jotka ovat olemassa samanaikaisesti: (Mitchell 1993)

Vesi	Vettä saatavilla jäälinsien muodostumispaikalla.
Pakkanen	Maakerroksen lämpötilan täytyy olla alle 0 celsiusastetta.
Routiva materiaali	Maamateriaalin täytyy olla routivaa.

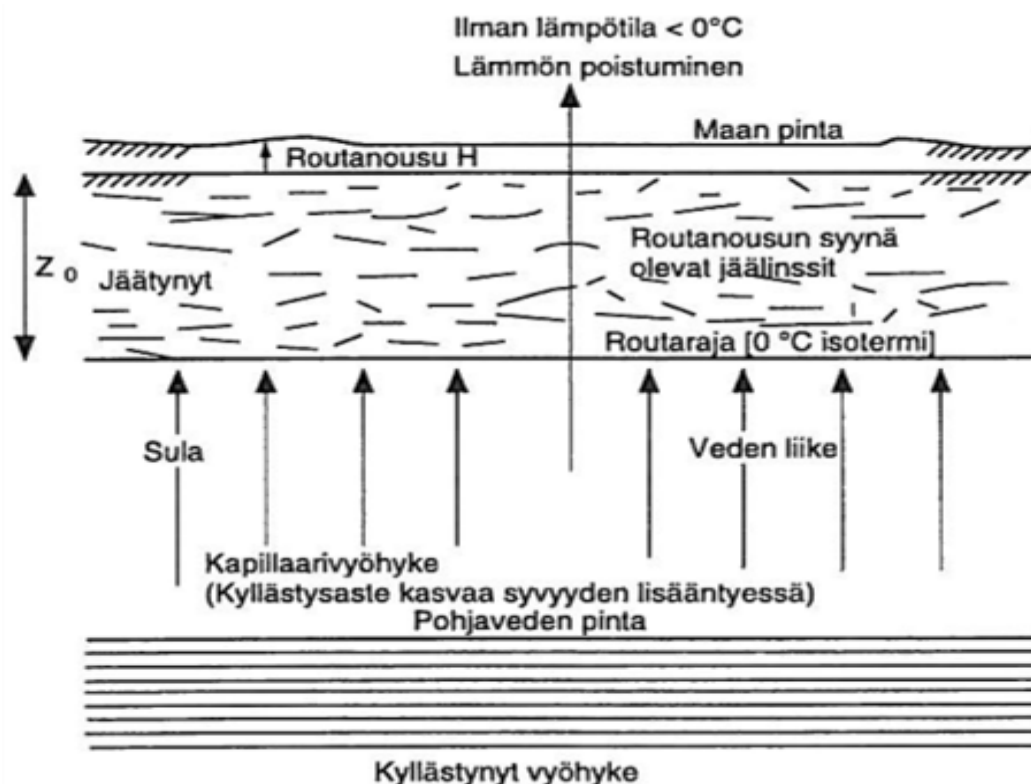
Jos jokin routimisen edellytyksistä puuttuu, jäälinsien muodostumista ei tapahdu eikä maa roudi. Materiaali määritellään ISSMFE:n (1989) mukaan routimattomaksi, jos materiaalissa ei tapahdu merkittävää jäälinsien muodostumista. Routimattoman materiaalin määritelmässä olosuhdetekijät rajataan tulkinnan ulkopuolelle, jotta routimista voidaan tarkastella maalajiominaisuutena. (Nurmikolu 2004)

3.1.2 Routimisen aiheuttama routanousu

Routanousu on maanpinnan pystysuuntaista liikettä, joka johtuu maassa olevan veden jäätymisestä. Paikalliset olosuhteet: jäätyislämpötila, veden saatavilla olo ja maamateriaalin routivuus aiheuttavat vaihteluita routanousun määrään radalla, jolloin routanousut ovat epätasaisia. Epätasainen routanousu ilmenee radassa odottamattomina raidegeometrian muutoksina. Usein radassa tapahtuvat geometrian muutokset aiheuttavat rataosuuden nopeusrajoitusten merkittävää alentamista tai vaativat tilapäisiä radan kunnossapitotoimenpiteitä, kuten raiteiden kiilausta. Radan kunnossapitotoimenpiteillä minimoidaan junaonnettomuuksien mahdollisuudet ja säilytetään hyvä matkustusmukavuus.

Routimisessa muodostuu jäälinssejä, jotka voivat aiheuttaa merkittäviä pystysuoria liikkeitä maaperään. Routanousua ilmenee jäätyvässä maassa, kun pakkasen tunkeutuminen hidastuu maaperässä ja jäätymisvyöhykkeeseen alkaa virrata vettä ympärillä olevasta sulasta maasta. Tällöin jäälinssejä alkaa muodostua jäätymisvyöhykkeen yläosaan. Jäälinsien muodostuminen alkaa, kun routarajalta poistuu yhtä paljon lämpöä kuin sinne kulkeutuu. Jäälinsien muodostumisen seurauksena routaantuvan maan tilavuus kasvaa, mikä havaitaan ratarakenteen pinnan routanousuna. Routanousun aiheuttaman maan pystysuoran liikkeen suuruus riippuu jäälinsien paksuudesta. Jäälinsien muodostuminen on monimutkainen prosessi, johon vaikuttavat lämmön ja veden kul-

keutuminen jäätyvässä maassa sekä routanousupaine. Routimisilmiötä havainnollistetaan kuvassa 3.1. (Nurmikolu 2004)



Kuva 3.1. Routimisilmiö ja routanousun syntyminen (Hafeez 1993).

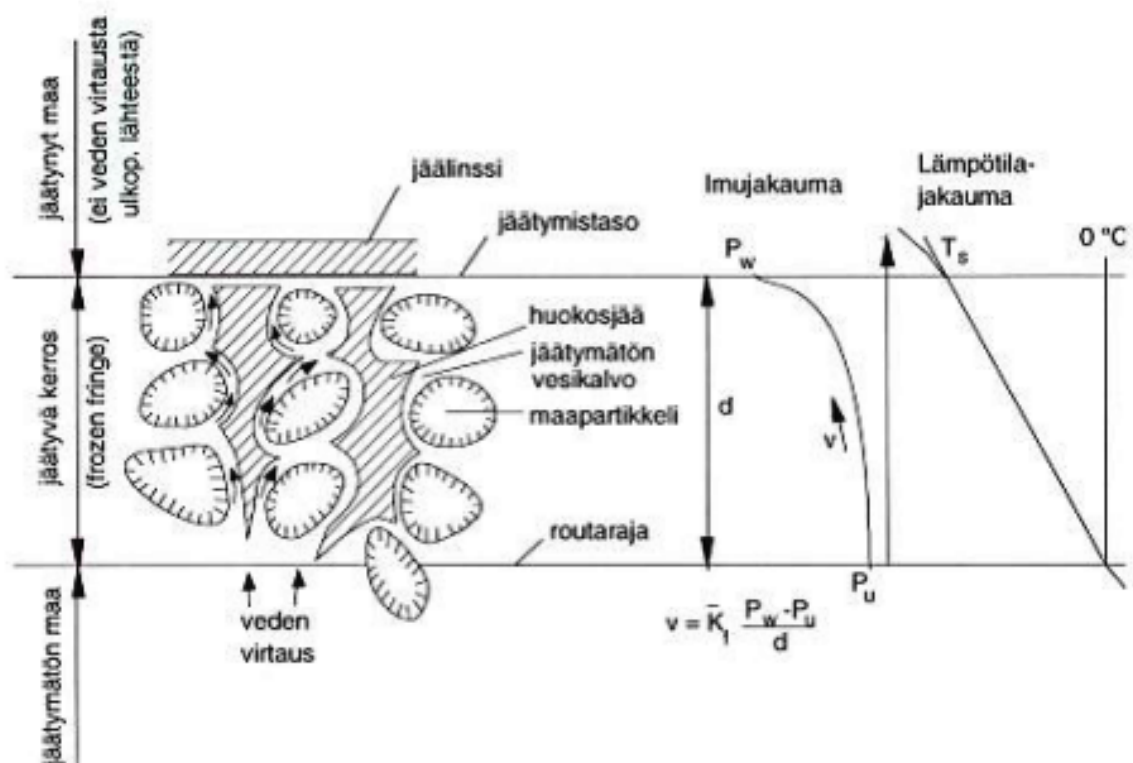
3.1.3 In-situ routanousu

In-situ jäätymisessä vesi jäätyy paikalleen maapartikkeleiden väleissä oleviin tyhjätiloihin ja aiheuttaa in-situ routanousua. In-situ jäätymistä tapahtuu erityisesti, kun maa jäätyy nopeasti. (Konrad 1984) Huokosveden in-situ jäätyminen voi aiheuttaa routanousua routimattomassa maarakenteessa, joka on täysin tai osittain vedellä kyllästynyt. Maassa olevan huokosveden jäätyessä veden tilavuus kasvaa noin 9 %. In-situ routanousun syntyminen edellyttää, ettei jäätyvällä huokosvedellä ole mahdollisuutta laajentua alkuperäisessä huokostilassaan. Tällöin sulaa huokosvesi ei pääse poistumaan jäätymisvyöhykkeestä jäätyvän huokosveden puristamana maarakenteessa sivuille tai alaspäin maan tilavuuden kasvamatta. Tämän määritelmän perusteella myös routimaton materiaali voi routia vähäisessä määrin huokosveden jäätyksen seurauksena. In-situ routanousua pidetään myös haitallisena routaantumisolmiönä. (Nurmikolu 2004)

Täysin vedellä kyllästyneessä rakenteessa in-situ routanousun suuruus on laskennallisesti materiaalin huokoisuuden ja jäätymislaajenemisprosentin tulo. In-situ routanousu on pieni verrattuna routimisen aiheuttamaan routanousuun, mutta radan suuren tasaisuusvaatimuksen seurauksena in-situ routanousu ei ole merkityksetön. In-situ routanousu on usein tasaista verrattuna routimisen aiheuttamaan routanousuun. (Nurmikolu 2004)

3.1.4 Maamateriaalin ja veden yhteistoiminta routimisilmiössä

Routimisilmiössä tapahtuvan veden jäätymisen ja siten maan tilavuuden kasvun seurauksena syntyvän routanousun tutkimuksissa veden rooli on merkittävä. Erityisen merkittävää routimisen kannalta on veden imeytyminen routivaan maakerrokseen. Veden imeytymisestä jäätymisvyöhykkeeseen ja veden imun aiheuttajasta on useita tarkastelutapoja. Veden imun taustalla on kolme vallitsevaa teoriaa, joita ovat primäärinen ja sekundaarinen routanousuteoria sekä adsorptiovoimateoria. Primäärisessä teoriassa jäälinssi muodostuu ainoastaan routarajalla. Sekundaarisessa teoriassa jäälinssi muodostuu hieman routarajan kylmemmällä puolella. Adsorptiovoimateoriassa veden jäätyminen tapahtuu osittain jäätyneen kerroksen yläpinnassa, samoin kuten sekundaarisessa teoriassa, mutta veden imuteoriat eroavat toisistaan. (Nurmikolu 2006) Kuva 3.2 havainnollistaa osittain jäätyntä maakerrosta ja veden kulkeutumista jäätymisprosessissa.



Kuva 3.2. Veden kulkeutuminen jäätymisprosessissa (Kujala 1994).

Vesi voi olla maapartikkeliin eriaisteisesti sitoutuneena tai vapaana vetenä. Maan routaantuminen alkaa löysästi kiinnittyneen huokosveden jäätymisellä maapartikkeleiden huokostilojen keskeltä edeten lämpötilan laskiessa kohti huokostilan reunoja ja siellä tiukemmin sitoutuneina olevia vesikerroksia. Löysimmin sitoutunut vesikerros on huokostilan keskellä oleva gravitaatiovesi. Maapartikkeleiden pinnoilla on tiukimmin sitoutuneena vesikerroksena adsorptiovesikerros, jolla on kyky säilyä nestemäisenä alle 0 °C lämpötiloissa, jolloin sulaa adsorptiovesikerros voi johtaa vettä jäälinssin alapuolisista sulista kerroksista jäälinssiin. (Nurmikolu 2006)

Vesimolekyylit voivat sitoutua maapartikkeleiden pinnoille, koska negatiivisen sähkövarauksen omaavat maapartikkelit vetävät puoleensa huokosveteen liuenneita kationeja tai dipolirakenteen ansiosta positiivisesti varautunutta vettä. Maapartikkeliin kiinnittyvät vesimolekyylit voivat kiinnittyä jatkuvasti uusiin vesimolekyyliin, jolloin sitoutuneen veden määrä kasvaa kerroksittain maapartikkelin pinnalta ulospäin. Vesi voi kiinnittyä maapartikkeliin myös ionien välisen osmoottisen vetovoiman avulla. (Nurmikolu 2006)

Routimisilmiöön vaikuttaa sulan veden määrä alle 0 celsiusasteen lämpötiloissa. Sulan veden määrään vaikuttaa erityisesti lämpötila, maalajiominaisuudet ja paine (Anderson ja Tice 1972; Horiguchi 1985; Anderson 1989; Kujala 1989). Maalajiominaisuuksista merkittävimpänä pidetään maan ominaispinta-alaa, joka tarkoittaa maapartikkeleiden yhteenlaskettua raepinta-alaa paino- tai tilavuusyksikköä kohti. Suuremman raepinta-alan omaava maa pystyy sitomaan enemmän adsorptioivettä rakeiden pinnoille, jolloin sulaa vettä säilyy enemmän alle 0 celsiusasteen lämpötiloissa.

Maalajiominaisuuksista sulan veden määrään alle 0 celsiusasteen lämpötiloissa vaikuttavat maapartikkeleiden ominaispinta-alan lisäksi huokosten hienorakenne, partikkelin pakkautumisgeometria, pintavaraustiheys ja vaihtokykyisten ionien laatu. (Anderson, Tice 1972; Horiguchi, 1985; Nurmikolu 2006)

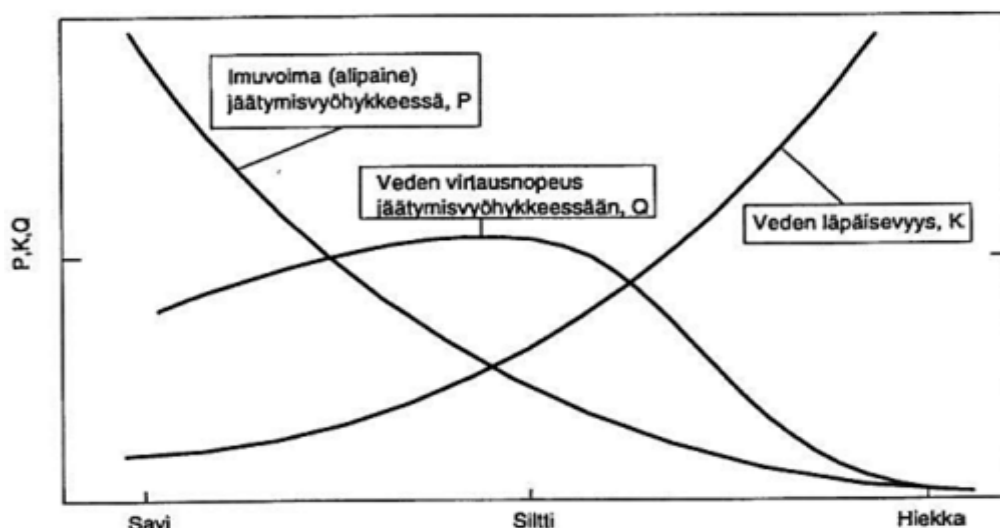
Osittain jäätyneen kerroksen vedenläpäisevyys edellyttää jäätyvätöntä vettä alle 0 celsiusasteen lämpötiloissa. Vedenläpäisevyys heikkenee kyllästyneessä maassa rae-koon pienentyessä. Suuren rakeiden ominaispinta-alan ja paljon sulaa vettä alle 0 celsiusasteen lämpötiloissa omaavien savimaalajien routimisherkkyyys on pienempi kuin hyvän vedenläpäisevyyden omaavien silttimaalajien. Maalajien rakeiden ominaispinta-alan vaikutuksesta routimisherkkyyteen voidaan päätellä routimisherkkyyden riippuvan merkittävästi maalajin hienoaineksen määrästä ja laadusta, koska hienoaineksen pienimmillä rakeilla on suuri ominaispinta-ala. (Nurmikolu 2006).

3.1.5 Veden kulkeutuminen jäätimisvyöhykkeeseen routimisilmiössä

Niin kauan kuin vettä kulkeutuu jäätimisvyöhykkeeseen ja lämpötilagradientti pysyy vakiona, voivat jäälinsit kasvaa lähes loputtomasti. Jäälinsien kasvaminen hidastuu, kun veden kulkeutuminen jäätimisvyöhykkeen alapuolisista kerroksista jäätimisvyöhykkeeseen vähenee. Kun veden kulkeutuminen kasvaviin jäälinsseihin rajoittuu ja jäätimisvyöhykkeen yläpuolisesta jäätyneestä maasta poistuu enemmän lämpöä kuin routarajalla vapautuu veden jäätyessä, niin routaraja alkaa tunkeutua syvemmälle maaperään. Routaraja tunkeutuu syvemmälle maaperään, kunnes routarajalle muodostuu suotuisat olosuhteet uuden jäätimisvyöhykkeen ja jäälinsin muodostumiselle. Tällä tavoin routaraja etenee syvemmälle muodostaen jäälinssejä kohtisuorassa lämpövirtauksen poistumissuuntaan nähden. (Harris 1995) Jäälinsikerroksia erottaa toisistaan jäätyneet maakerrokset. Routarajan edetessä syvemmälle jäälinsien jäätimisvyöhykkeistä muodostuu paksumpia ja niiden väliset välimatkat kasvavat.

Vesi voi kulkeutua jäätimisvyöhykkeeseen kolmella tavalla jäätimisvyöhykkeen alapuolisista sulista kerroksista. Vesi voi kulkea jäätimisvyöhykkeeseen jäätimis-

vyöhykkeessä vallitsevan alipaineen takia. Jäätymisvyöhykkeen alapuolisessa lämpimässä maassa vallitsee suurempi paine kuin sen yläpuolisissa maakerroksissa. Tämän takia vesi virtaa kohti kylmempää ja matalapaineisempaa jäätymisvyöhykettä, jossa sulaa vesi kiteytyy jääksi. Toinen veden kulkeutumistapa jäätymisvyöhykkeeseen on veden osmoottinen imu. Veden kiteytyessä jääksi vedestä erottuu suoloja viereisiin ja alempiin suliin vesipartikkeleihin, joiden ionikonsentraatio kasvaa ja veden jäätymislämpötila laskee. (Cary ja Mayland 1972; Panday ja Corapcioglu 1991; Guthrie ja Zhan 2002) Suuren ionikonsentraation omaavat vesipartikkelit pyrkivät tasapainotilaan eli matalampaan konsentraatioon/suolapitoisuuteen. Tästä johtuen vesi pyrkii ylemmäs kohti jäätymisvyöhykettä, jossa vallitsee pienempi suolapitoisuus. Kolmas veden kulkeutumistapa on veden kapillaarinen nousu. Maapartikkeleiden pinnat ja maahuokoset maapartikkeleiden välissä muodostavat vedelle virtauskanavan, jota pitkin vesi voi kulkea jäätymisvyöhykkeeseen. Veden kulkeutuminen maassa riippuu myös maalajista. Eri maalajeilla on erilaiset vedenjohtamisominaisuudet, joita on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Veden kulkeutuminen jäätymisvyöhykkeeseen eri maalajeissa (Ehrola 1996).

3.1.6 Routimisen aiheuttama routanousupaine ja kuormitus

Jäätymisvyöhykkeen yläpuolisten jäätyneiden rakennekerrosten paino lisää jäätymättömän veden painetta jäätymisvyöhykkeessä jäätyneen ja sulan maan rajapinnassa (Cary 1987). Jäätymisvyöhykkeeseen kohdistuva kuormitus pienentää maan routimisherkkyyttä ja siten routanousun suuruutta. Kuormituksen kasvaessa jäätymisvyöhykkeen yläpuolinen paine kasvaa alipainetta suuremmaksi, jolloin jäätymisvyöhykkeen veden saanti loppuu. (Ehrola 1996)

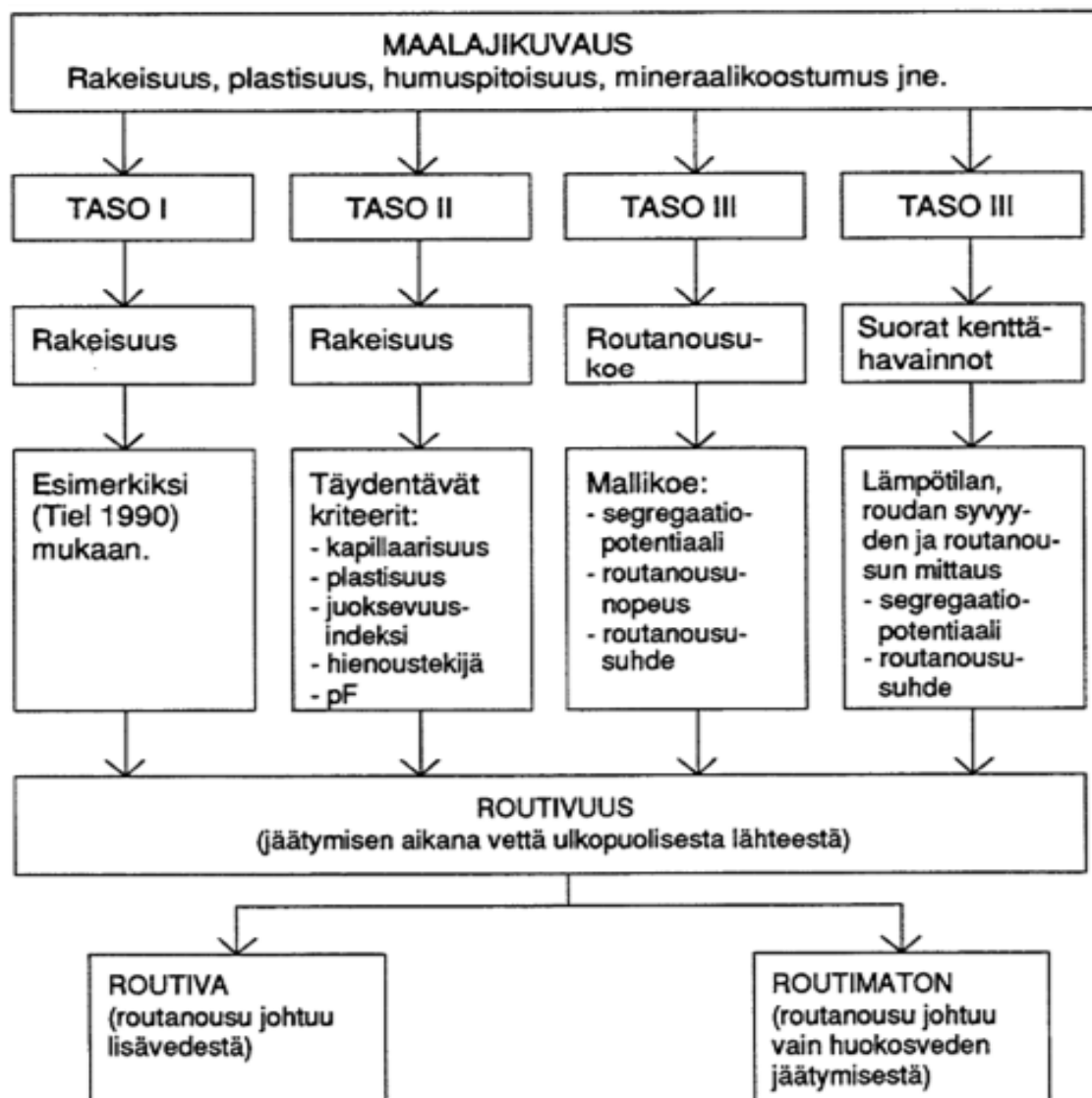
Maksimaalinen routimispaine riippuu pääasiassa maalajista. Jokaisella maalajilla on tietty roudan syvyys, jonka jälkeen maalaji ei aiheuta enää routanousua, koska jäälinssijä ei enää muodostu tätä syvemmälle. Routimista vastustavan kuormituksen ollessa erittäin pieni voi kasvavien jäälinssien huokosiin jäädä ilmaa, jolloin routiminen lisääntyy. (Ehrola 1996)

Kuormitus voi olla jäätymisvyöhykkeen yläpuolisten maamassojen painoa ja pohjaveden imukuormitusta. Yläpuolisten maamassojen kuormitukseen vaikuttavat rakenteen paksuus ja roudan syvyys rakenteessa. Kuormitusta aiheuttavat myös maan pinnalla olevat kuormat, kuten rakenteiden painot.

3.2 Routivuuden luokittelu ja routimisolosuhteet

3.2.1 Routivuuden luokittelumenetelmät

Maaperän routivuuden luokitteluun on kehitelty useita arviointitapoja. Luokittelutapojen teoreettisten taustojen perusteella voidaan valita tilanteeseen sopiva ja luotettava arviointitapa. Routivuuden luokittelumenetelmät voidaan jakaa kolmeen kategoriaan, joita ovat materiaaliominaisuuksien, laboratoriossa tehtävien routanousukokeiden tai kenttä-tutkimusten perusteella tehtävät routivuusluokittelut. Routivuusluokittelutapoja on esitetty kuvassa 3.4.



Kuva 3.4. Maalajien routivuuksien arviointiperusteet (ISSMFE 1989).

3.2.2 Routivuuden luokittelu indeksiominaisuuksien perusteella

Arvioitaessa maan routivuutta indeksiominaisuuksien perusteella tulisi lähtökohtana olla routivuuden tarkastelu maalajiominaisuutena. Maamateriaalin routivuus riippuu erityisesti hienoaineksen määrästä ja laadusta, minkä takia ainoastaan raekokojakaumaan perustuvan routivuuden arvioinnin käyttäminen on epävarmaa. Maamateriaalin rakeisuuteen perustuvat routivuuskriteerit on laadittu luonnonmaalajeille tehtyjen havaintojen perusteella eivätkä ne aina huomioi jalostettujen materiaalien, kuten kalliomurskeiden poikkeavia ominaisuuksia. Tämän takia täytyy huomioida maalajin muut ominaisuudet ja niiden vaikutukset routivuustutkimuksissa. Maalajin routivuutta arvioitaessa maalajin ominaisuudet voidaan liittää laboratoriossa tehtävien routanousukokeiden tuloksiin ja tutkia niiden vaikutuksia routivuuteen. Ratarakenteiden tutkimukset tutkivat pääasiassa materiaalien routimattomuutta, koska ratarakenteet pyritään mitoittamaan routimattomiksi. (Nurmikolu 2004)

Routimiseen vaikuttavat maalajiominaisuudet on lueteltu alla olevassa luettelossa. Kolme merkittävintä maalajiominaisuutta, jotka voivat vaikuttaa maalajin routivuuteen ovat raekoko, suolapitoisuus ja mineralogia. (Nurmikolu 2004) Routimiseen liittyviä maalajiominaisuuksia ja routimisen luokittelua maalajiominaisuuksien perusteella on käsitelty tarkemmin Nurmikolun (2004) kirjallisuusselvityksessä.

- Rakeisuus
- Ominaispinta-ala
- Huokoskokojakauma
- Konsistenssiominaisuudet
- Hienoustekijä
- Kapillaarinen vedennousukorkeus
- Vedenpidätyskyky
- Jäätymättömän veden määrä tietyssä alle 0 asteen lämpötilassa
- Huokostilavuus
- Mineralogia
- Vedenläpäisevyys

3.2.3 Routimisen luokittelu routanousukokeiden perusteella

Routanousukokeilla voidaan luokitella maamateriaalit routimisherkkyyksittään. Routanousukokeilla voidaan määrittää maalajien segregatiopotentiaali, joka kuvaa maalajin routimisherkkyyttä. Segregatiopotentiaali määritellään jäätymisvyöhykkeen vedenimeytymisnopeuden ja lämpötilagradientin suhteena. Routanousukokeilla voidaan tutkia myös routanousunopeuksia ja antaa routimiskriteerejä routanousunopeuden mukaan. (Nurmikolu 2006)

Routanousukokeita on kolmea periaatetyyppiä. Yleisimmässä koetyypissä vakio­lämpötilakokeessa, käytetään näytteen jäädyttämisessä vähintään yhtä portaittaista lämpötilan muutosta. Vakio­lämpötilakokeiden perusteella määritetään segregatiopotentiaali. Vakioroutaantumisnopeuskokeessa näytteen jäädyttävää lämpötilaa alennetaan

jatkuvasti, jotta jäätymisraja etenisi tasaisesti routanousukokeen edetessä. Vakioroutaantumisenopeuskokeessa tutkitaan tasaisella nopeudella etenevän routaantumisen aiheuttamaa routanousua. Harvinaisempi routakoetyyppi on lämmön poistumiseen vakionopeudella perustuva koetyyppi. (Nurmikolu 2006)

Yleisen ja yhtenäisen koejärjestelymenetelmän puuttuessa edellä mainittuihin routakoetyyppeihin perustuvia routanousukoejärjestelyjä on lukematon määrä. Koejärjestelyt poikkeavat toisistaan laitteiston, reunaehtojen ja näytteiden valmistelun osalta. Monien routanousukoejärjestelyjen takia koetulosten vertailu on hankalaa. Tästä syystä routanousukokeita pidetään indeksikokeina, joilla voidaan tutkia eri materiaalien suhteellista routimisherkkyyttä. Routanousukokeilla voidaan huomioida paikalliset olosuhteet muodostamalla routanousukoejärjestelyt in-situ olosuhteita vastaaviksi. Routanousukoetulosten analysoinnissa ongelmia tuottaa routimattomalle materiaalille sallittavan routanousun määrittäminen, koska routimattomassakin materiaalissa voi tapahtua in-situ routanousua.

Useimmilla routanousukoejärjestelmillä mitataan ainakin routanousun määrää, lämpötilavaihteluita ja vedenimua. Routimispaine on tärkeä tekijä routimisessa. Pinnan routanousua ja routanäytteen lämpötilaa mitataan yleensä jatkuvana koko kokeen ajan. Näytteen vedenimua voidaan tarkkailla paine-eron avulla, mutta yleisin tapa on punnita näyte kuivana ennen koetta, säännöllisesti kokeen aikana ja kokeen jälkeen. Näytteen havaitusta painoerosta voidaan laskea imeytyneenveden määrä. Kokeissa käytetty lämpötilagradientti pyritään säätämään vastaamaan koekappaleen luonnollisia olosuhteita, jotta koetuloksia voidaan verrata kenttähavaintoihin. Lämpötilagradienttia säädetään routakoelaitteistossa muuttamalla koekappaleen pintaa jäädyttävän elementin ja pohjaa lämmittävän elementin lämpötiloja sopivan lämpötilaeron saavuttamiseksi. Lämpötilagradienttia voidaan säätää myös näytekorkeutta muuttamalla. Pienempi näytekorkeus vaatii pienemmän lämpötilaeron kuin korkea näyte saavuttaakseen tavoitellun lämpötilagradientin. Koejärjestelyistä riippuen koekappale voidaan kyllästää kokonaan tai osittain ennen koetta ja kokeen aikana näytteellä voi olla lisävedenimumahdollisuus.

Routanousu tapahtuu luonnossa pystysuorassa suunnassa, koska vieressä oleva maa estää routimisen vaakatasossa. Tästä johtuen routakokeissa näytteiden vaakasuuntainen laajeneminen on estetty. Muotin ja näytteen välisen kitkan vaikutukset on myös minimoitu. Kaikilla routakoejärjestelmillä ei voida mitata näytettä kuormittavaa voimaa, mutta kuormittava voima on hyödyllinen tieto tutkittaessa kenttäolosuhteissa tapahtuvaa routimiskäyttäytymistä. Routakoelaitteisto tulisi suunnitella monen koekappaleen samanaikaiselle kokeelle, jotta testausolosuhteet olisivat mahdollisimman samankaltaiset ja koetulokset olisivat vertailukelpoisia. Routan sulamista ja sulamispehmenemistä voidaan tutkia samalla routakoejärjestelmällä sulattamalla koekappale halutuissa olosuhteissa ja testaamalla koekappaleen kestävyyttä ja jäykkyyttä rasisukokeilla. Routanousukokeeseen vaikuttavia tekijöitä on koottu alla olevaan luetteloon. (Kujala 1991)

Koelaitteisto:

- Näytteen ja koesellin välinen kitka
- Jäädytysuunta
- Sellin koko
- Mittausjärjestelmä

Reunaehdot:

- Kylmän ja lämpimän puolen lämpötilat
- Pintakuorma
- Vedenpinnan asema
- Kokeen kesto

Näyte:

- Näytteen koko
- Maksimiraekoko
- Tiiviys
- Kosteuspitoisuus
- Kyllästysaste
- Tiivistysmenetelmä

3.2.4 Maan vesiolosuhteiden vaikutus routimiseen

Maaperään jäätyvä vesi voi olla peräisin monista eri lähteistä, kuten sadannasta tai pohjavedestä. Vesilähteen etäisyys jäätymisvyöhykkeestä vaikuttaa suoraan routanousuopeuteen. Suurempi maaperän kosteusprosentti lähellä jäätymisvyöhykettä aiheuttaa suurempia routanousuja. (McGaw 1972) Maaperän ei tarvitse olla tasaisesti vedellä kyllästynyt aiheuttaakseen routanousuja. Jäätymisvyöhykkeen läheisyydessä oleva vesilähde riittää muodostamaan jäälinssejä veden kulkeuduttua jäätymisvyöhykkeeseen, jos vesi täyttää jäätymisvyöhykkeessä olevat yksittäiset huokokset. (Dirksen ja Miller 1966)

Pohjaveden syvyys vaikuttaa roudan muodostumiseen, sulamiseen ja maan routimiseen. Lähellä maanpintaa oleva pohjavesi hidastaa roudan tunkeutumista. Mutta korkealla olevalla pohjavedellä on edellytykset aiheuttaa suurempia routanousuja kuin syvällä sijaitsevalla pohjavedellä, koska lähellä maanpintaa sijaitseva pohjavedellä on paremmat edellytykset virrata jäätymisvyöhykkeeseen. (Soveri ja Varjo 1977)

Routimiseen ja routanousuun vaikuttaa maan vesipitoisuus. Vesipitoisuus tarkoittaa maa-aineksessa olevan veden massan suhdetta kuivan maa-aineksen massaan. Rakennekerroksissa olevan veden olomuodoista vapaa vesi on ainut, jonka määrään voidaan vaikuttaa rakenteen kuivatustoimenpiteillä. (Aittomäki 1986; Rantamäki et al. 1979)

3.2.5 Routimisen luokittelu in-situ/ kenttätutkimusten perusteella

Maan routivuuden arviointi in-situ tutkimusten perusteella tarkoittaa routivuuden tarkastelua maakerroksen in-situ ominaisuutena. In-situ ominaisuudet huomioivat paikalliset

routimis- ja ilmasto-olosuhteet, kuten pohjavedenpinnan aseman, pintakuorman, pak-
kaskertymän, lumipeitteen paksuuden ja routaantumisenopeuden.

Kenttätutkimukset ovat yleensä pitkän aikavälin tutkimuksia, joissa kerätään tie-
toja vallitsevista olosuhteista, routanousuista ja roudan syvyyksistä. Kenttätutkimukset
ovat hyödyllisiä ja tarpeellisia laboratoriokoetulosten oikeellisuuden ja luotettavuuden
arvioinnissa. Kenttätutkimuksissa ei voida vaikuttaa vallitseviin olosuhteisiin, joten rou-
tanousuja ja roudan syvyyksiä tutkittaessa mitataan myös ilman lämpötilaa, maakerros-
ten lämpötiloja, sademäärää, lumensyvyyttä, maan kosteuspitoisuutta ja pohjavedenpin-
nan korkeutta.

Lämpötiloja voidaan mitata asentamalla kalibroituja lämpötila-antureita maan
rakennekerrokseen tietyin välimatkoin halutulle syvyydelle asti, jolloin maasta saadaan
jatkuva lämpötilaprofiili. Lämpötilaprofiilista havaitaan routarajan eteneminen talven
aikana. Kalibroituja kosteusantureita voidaan asentaa mittamaan maan vesipitoisuuksia
eri syvyyksiltä, jolloin saadaan maan vesipitoisuuden vuodenaikaisvaihtelut ja voidaan
tutkia routimisen ja maan kosteuden yhteyttä. Maanpinnan routanousua voidaan mitata
vaatuksin tai siirtymäanturein, jotka tukeutuvat liikkumattomaan kiintopisteeseen. Tal-
ven maksimaalisen routanousun määrästä voidaan arvioida routahaittojen vakavuutta.
Keväällä roudan sulaessa kenttätutkimuksissa ollaan kiinnostuneita roudan sulamis-
pehmenemisestä ja sen vaikutuksista maan kantavuuteen. Tällöin maan kantavuutta voi-
daan testata esimerkiksi levykuormituskokeella.

3.3 Roudan sulaminen

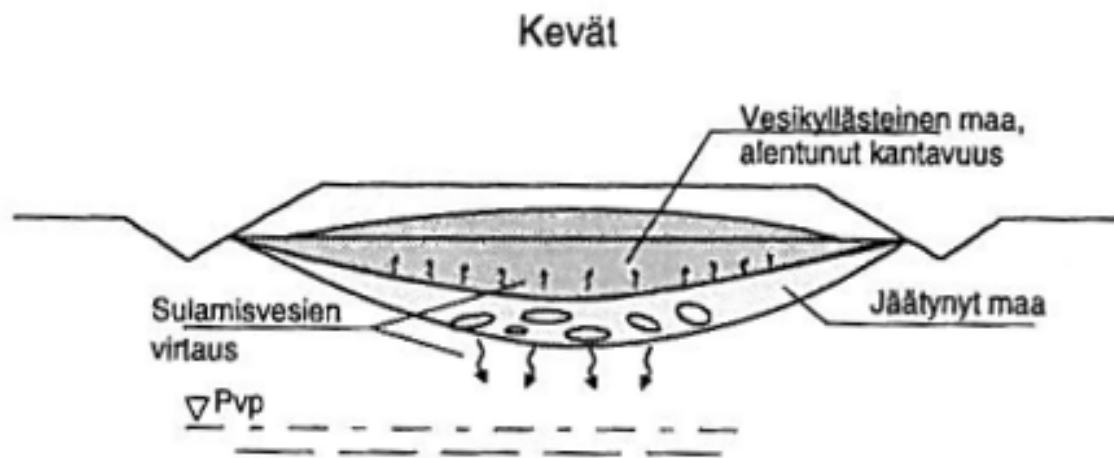
3.3.1 Roudan sulamispainuma

Roudan sulaminen alkaa maanpinnalta, kun talven pakkassumma ei enää kasva. Sulaes-
saan routunut maa kokoonpuristuu omasta painostaan tai ulkoisen lisäkuorman vaiku-
tuksesta, josta aiheutuu sulamispainuma. Sulamispainuma voi syntyä myös, kun jääty-
neenä tiivistetty maarakenne tai jäätyneestä maasta rakennettu maarakenne sulaa. Useita
kertoja routunut maa palautuu yleensä jäätymistä edeltäneeseen tiheyteen. Sulamis-
painumia voi syntyä, jos jäätyneen maakerroksen päällä olevaa vedellä kyllästynyttä
maakerrosta kuormitetaan. (Saarelainen 1990)

3.3.2 Roudan sulamispehmeneminen

Sulan roudan alapuolella oleva sulamaton routakerros estää sulan veden valumisen
alempiin rakennekerrokseen, mikä aiheuttaa sulan maan kyllästymisen vedellä, jolloin
rakenteen kantavuus alkaa heikentyä. Radalla sulamispehmenemistä voidaan olettaa
tapahtuvan alusrakenteessa, johon kulkeutuu hienorakeista maa-ainesta ylemmistä ra-
kennekerroksista sade- ja sulamisvesien mukana. Keväällä radan reunoille kerääntynyt
lumi alkaa sulaa ja sulamisvedet voivat suotovirrata rakenteeseen. Myös sivuojusta tai
radan päällysrakenteen läpi voi suotautua vettä radan rakennekerrokseen, joten alusra-
kenteessa voi olla keväällä erittäin paljon vettä. Kohdistettaessa tällaiseen rakenneker-

rokseen ratapölkyltä tuleva junan ja ylempien maakerrosten aiheuttama kuormitus kylästynyt maa voi häiriintyä ja muuttua juoksevaksi, jolloin se menettää kantavuuttaan.



Kuva 3.5. Rakennekerrosten kantavuuden aleneminen roudan sulamispehmenemisen seurauksena (Rahiala 1988).

Kantavuuden menetys johtuu alusrakenteen huokosvedenpaineen lisäyksestä, joka pienentää tehokasta jännitystä maassa ja tämä aiheuttaa leikkauslujuuden pienentymisen, jäykkyyden alenemisen sekä muodonmuutosten lisääntymisen. Huokosvedenpaineen suuruuteen vaikuttaa routineen maan sulamisnopeus, kokoonpuristumisen suuruus, maan huono vedenläpäisevyys ja rakenteen huonot kuivatusjärjestelyt. Käytännössä kantavuuden aleneminen riippuu ratarakenteen alusrakenteen routimisesta. Mitä enemmän rakenne routii, sitä suurempi on kevätkantavuuden aleneminen. Kasvaneen vesipitoisuuden aiheuttama kantavuuden aleneminen heikentää radan kuormituskestävyyttä ja lisää rakenteen vaurioherkkyyttä. Rakenteen vaurioituminen tarkoittaa radan rakenteen epätasaisia muodonmuutoksia, painumia ja raidegeometrian vääristymistä. Vedellä kyllästynyt pohjamaa pehmenee kuormituksen alla ja toistuva kuormitus lisää pohjamaan plastisia muodonmuutoksia, jotka voivat ääritapauksessa johtaa jopa alusrakenteen sortumiin. Alusrakenteen pehmeneminen aiheuttaa alusrakenteen painumia ja urautumia, jotka heikentävät rakenteen kuivatusta ja lisäävät rakenteen routahaittoja tulevaisuudessa. (Saarelainen 1990; Ehrola 1996; Rantamäki et al. 1979)

3.4 Lähtötiedot roudan syvyyden ja routanousun laskentaan

3.4.1 Routaantumisen ja routimisen laskentamallit

Routanousun laskentamallilla voidaan selittää tai ennustaa routanousuja. Laskentamallit voivat olla kokeellisia tai teoreettisia. Kokeelliset mallit koostuvat usein erilaisista parametreista, joiden tilastollisesti merkitsevien korrelaatioiden avulla selitetään routanousua. Korreloivia parametreja voivat olla esimerkiksi routanousunopeus ja routanousun määrä tietyn jäädytysvaiheen keston jälkeen (Chamberlain 1981).

Teoreettiset mallit perustuvat yleensä yhtälöihin, jotka sisältävät routanousukokeen muuttujia. Yhden muuttujan malli on yleisin mallinnustapa, mutta kahden tai kolmen muuttujan mallit voivat olla tarkempia. Kehittyneimmät mallit voivat sisältää eri ajanhetkittäin arviot lämpö- ja vesivirtojen määrästä, kosteuspitoisuuksista, kuormituksista sekä muista muuttuvista olosuhteista.

Täydellinen routanousumalli pystyy ennustamaan lämpötilan, sulan veden määrän, jään määrän ja liuoskonsentraation tietyllä syvyydellä tietyssä ajanhetkenä. Malli ennustaa myös routanousunopeuden, routanousun määrän, routimispaineen ja jäälinsien sijainnit maaperässä. Täydellinen malli ennustaa myös maaperän sulamista ja roudan sulamispehmenemistä.

Kehittyneet routimisen numeeriset mallit tarjoavat monia routanousun analysointimahdollisuuksia, mutta malliin syötettävien lukuisten lähtöarvojen saaminen on vaikeaa, koska kaikkia lähtöarvoja ei välttämättä ole saatavilla halutuissa olosuhteissa. Numeerisen mallin luotettavuus riippuu oikean simulointitekniikan ja sopivien lähtöarvojen valinnasta. Numeeristen mallien luotettavuutta voidaan arvioida luottamusrajoilla. Arvioimalla numeeristen mallien luotettavuutta tulosten tulkinta helpottuu.

Maan routaantumisen ja sulamisen mallintamisessa tarvitaan tietoja sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuudesta, sulan ja jäätyneen maan lämpökapasiteetista sekä maan olomuodonmuutoslämmöstä. Nämä suureet riippuvat maan fysikaalisista ominaisuuksista. (Saarelainen 1990)

Maan routaantumista ja routimista mallinnettaessa voidaan tutkia maan lämpötasetta, jota voidaan tutkia termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön avulla. (Saarelainen 1990)

3.4.2 Ratarakenteen roudan syvyyden laskentamalli

Roudan syvyyden laskemiseksi on kehitelty laskentamenetelmiä, joista yksinkertaisin on Stefanin kaava, jossa roudan syvyys riippuu pakkasmäärästä. Stefanin kaava on esitetty kaavassa (1) (Saarelainen 1990).

$$z = k\sqrt{F} \quad (1)$$

z on roudan syvyys

k on maalajikerroin

$$k = \sqrt{\frac{2\lambda}{L}}$$

λ on lämmönjohtavuus

L on jäätymislämpö

Tarkemmissa laskelmissa täytyy hyödyntää Fourierin differentiaalisia kaavoja, jotka huomioivat enemmän reunaehtoja. Stefanin kaavassa k -kerroin huomioi maalajityypin. Maalajikertoimen suuruutta voidaan arvioida korjauskertoimella. Lumen eristä-

vyys voidaan huomioida Stefanin kaavassa pienentämällä maahan vaikuttavaa pakkasmäärää korjauskertoimella a (kaava 2). Korjauskertoimen määrittämiseen on luotu kuvaajia pakkasmäärän ja lumen syvyyden funktiona. (Saarelainen 1990)

Roudan syvyyden tarkasti laskemiseksi Stefanin kaavalla täytyy korjauskertoimella huomioida maan tilavuuslämpökapasiteetti eli jäätyvän maan jäähtymislämpömaasta routaantumisen aikana poistuvan lämpömäärän osakomponenttina. Korjauskertoimella huomioitu Stefanin kaava on muotoa (3). Routaeristeitä käytettäessä saadaan ylisuuria roudan syvyysarvoja, joita voidaan pienentää laskemalla maapohjan lämpövuon sulatusvaikutus roudan alla. Roudan syvyyttä voidaan arvioida myös elementtimenetelmillä, mutta maapohjan lämpötekniikan laskelmien suorittaminen yleisillä elementtiosuhteilla on hankalaa. (Saarelainen 1990) Laskentamenetelmiä on käsitelty tarkemmin Nurmikolun ja Kolisojan (2002) julkaisussa Ratarakenteen routasuojaus.

$$F_{\text{red}} = a \cdot F \quad (2)$$

F_{red} on korjauskertoimella korjattu pakkasmäärä
 a on korjauskerroin pakkasmäärälle

$$z = \psi \cdot k \sqrt{F} \quad (3)$$

ψ on maan lämpökapasiteettia huomioiva korjauskerroin

3.4.3 Segregaatiopotentiaali ja routanousun laskentamalli

Segregaatiopotentiaali kuvaa maan routimisominaisuuksia. Segregaatiopotentiaali riippuu maalajista ja ulkoisen kuormituksen suuruudesta. Segregaatiopotentiaali määritetään routanousukokeiden avulla. Mitä pienempi segregaatiopotentiaalin arvo, sitä vähemmän maalaji routii. Segregaatiopotentiaali-teoriassa jäätymisvyöhykkeen yläpuolelle alkaa muodostua jäälinssi, kun jäätymisvyöhykkeen yläreuna saavuttaa segregaatiopotentiaalilämpötilan. (Ehrola 1996)

Segregaatiopotentiaali-teoriassa veden virtausnopeus jäälinssin muodostumisvyöhykkeelle on suoraan verrannollinen jäätymisvyöhykkeen lämpötilagradienttiin (Nurmikolu 2006).

Maan routimisominaisuuksia voidaan arvioida myös routimiskertoimen perusteella. Segregaatiopotentiaalin ja routimiskertoimen ero on laskentamenetelmässä. Routimiskerroin SP lasketaan routanousunopeuden avulla ja segregaatiopotentiaalin määrittämiseen tarvitaan veden virtausnopeus jäätymisvyöhykkeeseen. Segregaatiopotentiaali ei huomioi veden jäätymisestä aiheutuvaa 9 % tilavuuden kasvua, kuten routimiskerroin. Tästä johtuen segregaatiopotentiaalin määrittäminen ei kerro täysin tai lähes kyllästyneessä materiaalissa olevan veden jäätymisestä aiheutuvaa routanousua, kuten routimiskerroin. Segregaatiopotentiaali ja routimiskerroin eroavat myös lämpötilagradientin tarkastelutavassa. Segregaatiopotentiaalia määritettäessä tarkastellaan lämpötilagra-

dienttia osittain jäätyneessä kerroksessa, kun routimiskerrointa määritettäessä tarkastellaan koko jäätynyttä kerrosta. Routimiskerroin määritetään yhtälöllä (4). (Nurmikolu 2006)

$$SP = \frac{v}{grad\ T} = \frac{\Delta h \cdot Z}{\Delta t \cdot (0 - T_s)}, \text{ jossa} \quad (4)$$

v on routanousunopeus (mm/h)
 $grad\ T$ on jäätyneen maakerroksen keskimääräinen lämpötilagradientti [K/mm]
 Δh on routanousun lisäys aikavälillä Δt (mm)
 Δt on aikaväli (h)
 T_s on maanpinnan lämpötila (°C)

Maan routanousun arviointi voidaan tehdä maan materiaaliominaisuuksien, kenttäkokeiden tai laboratoriokokeiden kautta. Laboratoriokokeiden perusteella määritettävän segregatiopotentialin avulla routanousu voidaan laskea segregatiopotentialiteoriaan perustuen kaavalla (5). (Nixon 1982; Konrad 1980). Routanousun laskentamallissa voidaan ottaa huomioon in-situ routanousu kertomalla yhtälö 1,09:lla, jolloin yhtälö huomioi huokosveden jäätymisestä aiheutuvan 9 % tilavuuden kasvun.

$$H_s = t \cdot SP \cdot grad\ T_f \quad (5)$$

H_s on routanousu [mm]
 t on routimisajanjakso [h]
 SP on segregatiopotentiali [mm²/Kh] (routimiskerroin)
 $grad\ T_f$ on lämpötilagradientti routarajalla [K/mm]

3.4.4 Routamittaukset

Routamittauksissa tutkitaan roudan syvyyttä ja roudan aiheuttamaa routanousua. Roudan syvyysmittauksilla seurataan routarajan etenemistä maaperässä. Routahavainnoilla voidaan määrittää routimattomien rakennekerrosten paksuus ja routivien kerrosten sijainti ja routimiskertoimet. Routimattoman maan syvyys on syvyys, jossa routanousua alkaa muodostua, ellei rakenne ole täysin vedellä kyllästynyt ja rakenteessa oleva huokosvesi aiheuta in-situ routanousua. Usein seurataan myös roudan sulamista ja roudan sulamisesta aiheutuvaa sulamispainumaa sekä kantavuuden alenemaa.

Mittausten määrä ja ajoitus riippuvat mittauksen tarkoituksesta ja niille asetetuista vaatimuksista. Mittauksia on syytä tehdä läpi talven, jolloin saadaan selville routivuuden syvyyssuuntainen vaihtelu ja tiheän havaintovälin perusteella voidaan laskea routimiskertoimet. Roudan syvyyden ja routanousun maksimi-arvot sijoittuvat suurin piirtein ajankohtaan, jolloin roudan sulamiskausi alkaa ja lumi sekä jää ovat jo sulaneet maanpinnalta. Mittauspaikan valinta vaikuttaa roudan mittaustuloksiin. Mäet ja aukeat sekä aurinkoiset ja varjoiset kohdat routaantuvat ja sulavat eri tavoin. (Onninen, 2001)

Metyleenimittari

Metyleenimittari perustuu maahan upotettavaan putkeen, joka on täytetty metyleenisiniliuoksella, joka muuttaa väriä jäätyessään 0°C kohdalla. Jäätynyt metyleenisiniliuos on läpinäkyvää ja sula liuos on sinistä. Metyleenisiniliuoksen avulla tehtävät mittaukset ovat käsikäyttöisiä, koska putki täytyy ottaa ylös maasta mittarin luen-
nan ajaksi. Menetelmä on toimiva ja laajassa käytössä, mutta nykYTEKNIIKAN MAHDOLLI-
suuksiin nähden se on vanhanaikainen. (Luomala 2010)

Lämpötilamittaukset

Roudan syvyys voidaan määrittää luomalla maasta lämpötilaprofiili digitaalisten lämpö-
tila-antureiden avulla. Lämpötilaprofiilista arvioidaan roudan syvyys lämpötilan perus-
teella. Lämpötilaprofiilin luomisessa käytettävät anturit täytyy kalibroida, jotta vaaditta-
va mittaustarkkuus saavutetaan. Kenttäolosuhteisiin asennettavan maan lämpötilan mit-
tausjärjestelmän etäluenta on mahdollista GPRS-yhteyden avulla. Maan lämpötilamitta-
usten perusteella tehtäviä roudan syvyys mittauksia voidaan tarkentaa mittaamalla maan
dielektrisyttä ja sähkönjohtavuutta, koska kaikki maamateriaalit eivät jäädy -0°C läm-
pötilassa vaan vaativat alemman lämpötilan. (Luomala 2010)

3.4.5 Laskentamallien olosuhde- ja materiaalitiedot

Ilmasto-olosuhteita ja maamateriaalitietoja täydellisesti mallintava routanousumallia on
mahdoton luoda, mutta huomioimalla tärkeimmät tiedot voidaan päästä hyviin ennusta-
vuustuloksiin. Suomen olosuhteissa vuodenaikojen vaihtelu muuttaa hetkellisiä ilmasto-
olosuhteita merkittävästi.

Routimista mallinnettaessa kerätään mahdollisimman täydelliset talven ilmasto-
tiedot, jotka pelkistetään helposti käytettäviksi tiedoiksi. Päivittäisten lämpötilatietojen
perusteella lasketaan talven pakkasmäärä ja vuoden keskilämpötila. Pitkällä aikavälillä
routimisen ennustamisessa ollaan kiinnostuneita esimerkiksi kerran 50 vuodessa toistu-
vasta pakkasmäärästä, joka on tärkeä tieto ratarakenteiden routasuojauksen mitoitukses-
sa. Pakkaskauden pituus vaikuttaa usein routanousun määrään. Pakkaskautta edeltävät
päivittäiset sadantamäärät ovat tärkeitä tietoja, koska maassa olevan veden määrä vai-
kuttaa merkittävästi routaantumiseen ja routimiseen, kuten myös pohjavedenpinnan
korkeus. Päivittäisistä veden sadantamääristä voidaan laskea vuosittaisia sademääriä tai
routimiseen mahdollisesti vaikuttavien syyssateiden määriä. Talven aikana satavan lu-
men määrä halutaan tietää, jotta osattaisiin mallintaa roudan syvyyttä pienentävän lumi-
kerroksen vaikutus routaantumiseen ja routimiseen.

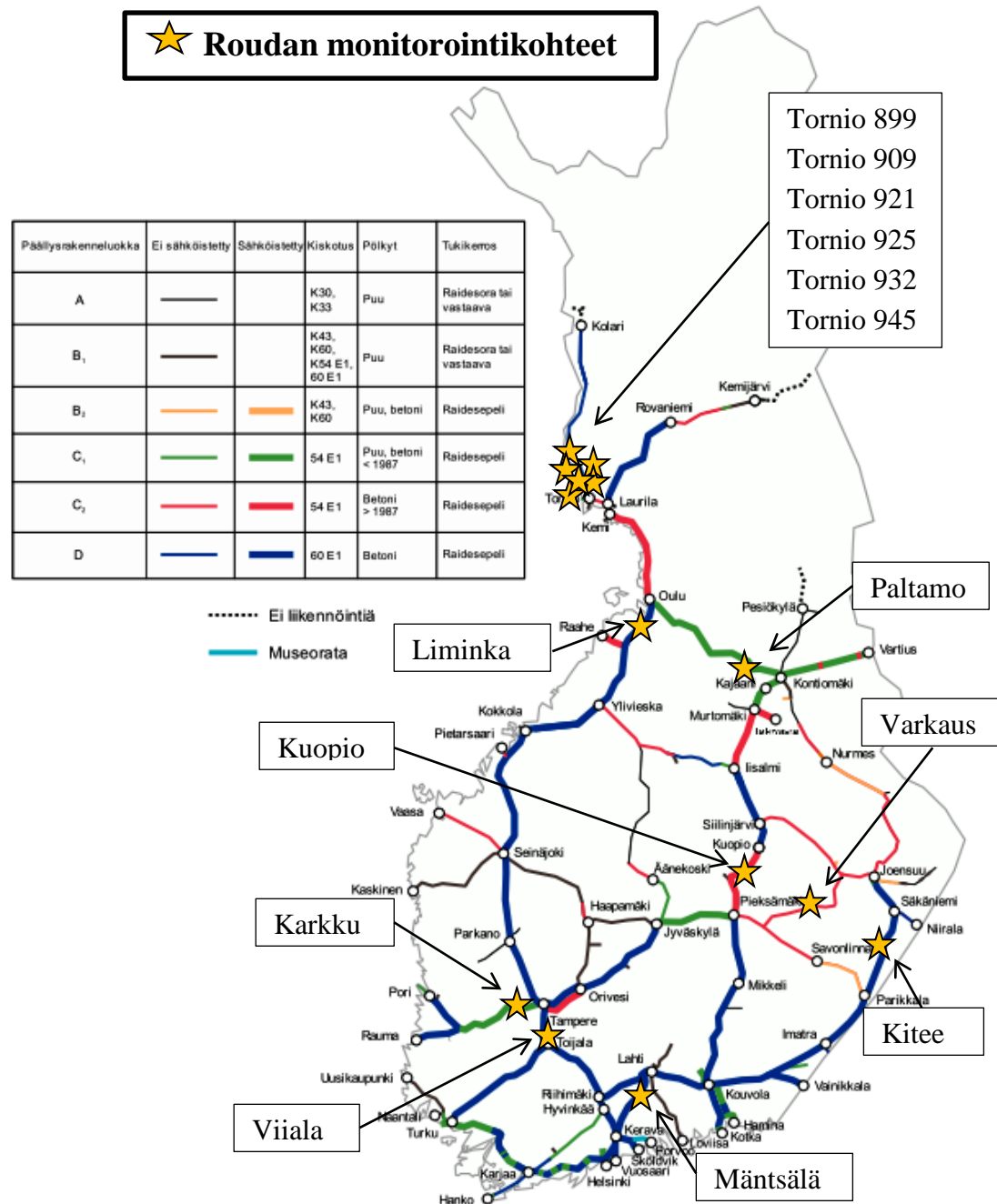
4 KOKEELLINEN ROUTATUTKIMUS RADALLA

4.1 Tutkimuskohteet

Kokeelliseen routatutkimukseen liittyy 14 kenttämittauskohdetta, joilla on roudanseurantalaitteisto. Routaseurantakohteet sijaitsevat kattavasti Suomen rataverkon eri osissa ja ominaisuuksiltaan erilaisilla rataosilla, jolloin tutkimuksen tulokset mahdollistavat erilaisten ratarakenteiden ja ilmasto-olojen keskinäisen vertailun. Kenttämittauskohteilta on mittausdataa 15 minuutin tai tunnin välein vuoden jokaiselta päivältä. Ensimmäisiltä tiedonkeruukohteilta mittausdataa on kertynyt vuodesta 2008 alkaen. Vuonna 2008 alkaneita tiedonkeruukohteita ovat Karkku, Liminka, Mäntsälä, Tornio 899, Tornio 909 ja Viiala. Vuonna 2009 alkaneita tiedonkeruukohteita ovat Tornio 921, Tornio 925, Tornio 932 ja Tornio 945. Uusimmat vuonna 2010 aloitetut tiedonkeruukohteet ovat Kitee, Kuopio, Paltamo ja Varkaus. Roudan monitorointikohteiden sijainnit on esitetty kuvan 4.1 kartalla ja taulukossa 4.1. Taulukossa 4.1 esitetään myös mittauskohteiden rakennekerrospaksuudet.

Kosteutta mitattiin seuraavilta kohteilta: Kitee, Kuopio, Paltamo, Tornio 921, Tornio 925, Tornio 932, Tornio 945 ja Varkaus.

Kokeelliseen routatutkimukseen sisältyy laboratoriossa tehtäviä routanousu- ja materiaalikokeita. Kokeita tehtiin kenttämittauskohteiden tuki- ja alusrakennekerroksista sekä pohjamaasta otetuille näytteille. Näytteitä oli ratarakenteen tuki- ja alusrakennekerroksista sekä pohjamaasta. Routanousukokeita tehtiin Karkun, Kiteen, Kuopion, Limingan, Paltamon, Varkauden ja Viialan tuki- ja alusrakennekerros- sekä pohjamaanäytteille. Tutkimuksessa hyödynnettiin myös aikaisemmin tehtyjä routanousukoetuloksia. Routanousukokeita oli tehty aiemmin neljälle Tornion kohteelle: Tornio 921, Tornio 925, Tornio 932 ja Tornio 945. Mäntsälän, Tornion 899 ja Tornion 909 kohteilta ei ollut saatavissa näytteitä ratarakennekerroksista.



Kuva 4.1. Suomen rataverkko, sen päällysrakenneluokat ja roudan monitorointikohteet (muokattu lähteestä Ratahallintokeskus 2011).

Taulukko 4.1. Mittauskohteiden sijaintitiedot ja rakennekerrospaksuudet. Tarkempia tietoja mittauskohteista löytyy Peltokankaan (2012) tutkimusraportista.

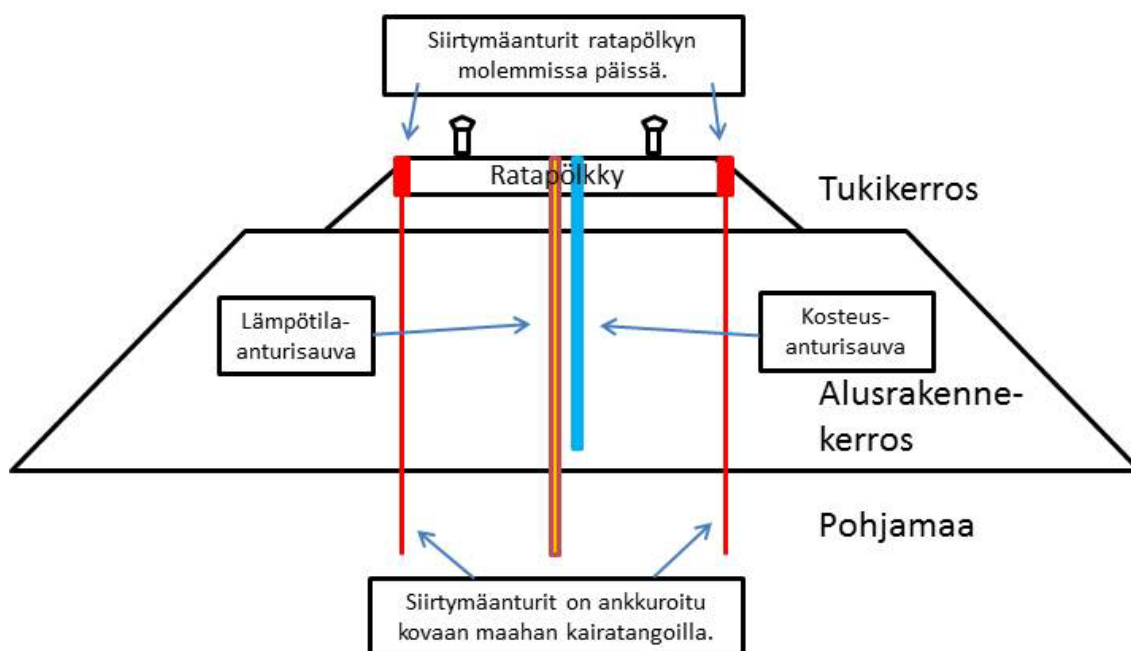
Mittaus kohde	Rataosa	Rataki- lometrit	Päällysrakenne- luokka/ sähköistetty	Lämpötila- anturit	Siirtymä- anturit	Kosteus- anturit	Rakennekerros paksuudet (kerrosrajan syvyys) [m]	
asennusvuosi				kpl/syvyys (m)		kpl/syvyys (m)	Tukikerros	Alusrakenne
Karkku (2008)	Suoniemi- Karkku	255+266	C ₁ /kyllä	12/ 0,1...2,9	kyllä	ei	0,7	0,45 (1,15)
Kitee (2010)	Kesälahti- Puhos	441+725	C ₂ /kyllä	36/ 0,18...2,73	kyllä	10/ 0,1...1,95	0,6	0,85 (1,45)
Kuopio (2010)	Suonenjo- ki-Kuopio	442+260	C ₂ /kyllä	36/ 0,23...2,03	kyllä	10/ 0,2...1,7	0,5+0,05 eristelevy (EPS)	0,75 (1,3)
Liminka (2008)	Liminka- Kempele	732+527	D/kyllä	12/ 0,1...3,1	kyllä	ei	0,9+0,05 eristelevy (EPS)	0,5 (1,45)
Mäntsälä (2008)	Mäntsälä- Sipilä	65+079	D/kyllä	12/ 0,1...2,64	ei	ei	0,55	2 (2,55)
Paltamo (2010)	Paltamo- Kivesjärvi	898+050	C ₁ /kyllä	36/ 0,2...3,05	kyllä	10/ 0,2...1,85	0,55	1,45 (2)
Tornio 899 (2008)	Tornio- Niemen- pää	899+498	D/ei	12/ 0,1...2,77	kyllä	ei	0,6	2 (2,6)
Tornio 909 (2008)	Tornio- Niemen- pää	909+600	D/ei	12/ 0,1...3,1	kyllä	ei	0,6	1,6 (2,2)
Tornio 921 (2009)	Tornio- Niemen- pää	921+050	D/ei	36/ 0,1...3,2	kyllä	4/ 1...1,6	0,5	1,1 (1,6)
Tornio 925 (2009)	Tornio- Niemen- pää	925+610	D/ei	36/ 0,1...2,55	kyllä	4/ 0,6...1,2	0,5	1,5 (2)
Tornio 932 (2009)	Niemen- pää- Kaulinran- ta	932+135	D/ei	32/ 0,1...2,8	kyllä	10/ 0,2...2,2	0,5	0,9 (1,4)
Tornio 945 (2009)	Niemen- pää- Kaulinran- ta	945+060	D/ei	32/ 0,1...2,67	kyllä	10/ 0,2...2,3	0,5	0,8 (1,3)
Varkaus (2010)	Varkaus- Heinävesi	445+300	C ₂ /ei	36/ 0,22...2,4	kyllä	10/ 0,24...1,8	0,6	0,45 (1,05)
Viiala (2008)	Viiala- Mattila	156+287	D/kyllä	12/ 0,1...3,1	kyllä	ei	0,65	0,45 (1,1)+0,1 eristelevy (XPS)

4.2 Kenttämittaukset ja ilmastotiedot

Roudan syvyyden ja routanousujen kenttämittaukset sisälsivät mittauskohteiden ratarakenteen lämpötila-, siirtymä- ja vesipitoisuushavaintoaineiston tutkimuksia. Kenttämittauskohteilta kerätty lämpötilamittausaineisto analysoitiin ja aineistosta luotiin lämpötilaprofiilit jokaiselle mittauskohteelle. Mittausjärjestelmä on Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikön kehittämä järjestelmä, jossa radan rakentamiseen, raiteen keskelle ratapölkkyjen väliin asennetaan anturisauva. Mittausjärjestelmään kuuluvien lämpötila-, siirtymä- ja kosteusantureiden sijainnit on esitetty mittausjärjestelmänperiaatekuvassa 4.2. Anturisauva sisältää määrävälein antureita, jotka ovat kalibroitu tarkasti hyvän mittaustarkkuuden varmistamiseksi. Anturisauvan pituus ja anturisauvan sisältämien anturien välinen etäisyys vaihtelee koekohteittain vastatakseen kohteen mittaustarpeeseen. Tärkeintä on mitata rakennekerrosten lämpötiloja ja routaantumista, mutta routarajan mahdollinen eteneminen pohjamaahan on myös mittausalueella. Anturisauvoja asennettaessa oletuksena on ollut, ettei routa etene millään koekohteella kolmea metriä syvemmälle. Radan rakennekerrosten lämpötilojen lisäksi mitattiin koekohteen ulkolämpötilaa anturilla, joka oli sijoitettu noin 1,5 metrin korkeudelle maan pinnasta. Ulkoilman lämpötila-anturi oli sijoitettu lämpökilven sisälle, joka esti auringon vaikutuksen mittaustuloksiin. (Luomala 2010)

Radan routanousu mitataan ratapölkyn molempiin päihin asennetuilla siirtymäantureilla. Routanousua mittaville siirtymäantureille täytyy luoda absoluuttisesti paikallaan pysyvä kiintopiste. Luotettavan tuloksen saamiseksi ratapölkyn pään viereen on asennettu kovaan maahan ankkuroidut kairatangot. (Luomala 2010)

Osalle roudan monitorointiasemista on asennettu ratarakenteeseen kosteutta mittavat anturit. Anturit on asennettu asennushiekalla täytetyn asennusputken sisään määrävälein. Asennusputki on asennettu ratarakenteeseen tunnetulle syvyydelle, jolloin voidaan tutkia ratarakenteen kerrosten kosteutta ajanhetkittäin.



Kuva 4.2. Mittausjärjestelmään kuuluvien lämpötila-, siirtymä- ja kosteusantureiden sijaintien periaatekuva.

Koekohteille asennettujen lämpötila- ja siirtymäantureiden arvot tallentuvat akukäyttöisen dataloggerin muistiin. Dataloggerin akku kestää talven yli ja se on varustettu gprs-tiedonsiirrolla, jonka avulla mittaus tulokset voidaan lähettää langattomasti halutulle palvelimelle. Tarkemmin koekohteiden monitorointi on selostettu Liikenneviraston julkaisussa Ratapenkereen monitorointi (Luomala 2010).

Roudan monitorointiasemien havaintotietojen keruu ja analysointi

Kenttämittaushavaintojen analysoimiseksi tehtiin joitakin tulkittamissääntöjä, jotta jokaiselta mittauskohteelta olisi vertailukelpoiset mittaushavainnot.

Roudan monitorointiasemien keräämistä mittaushavainnoista on tulkittavan tietomäärän vähentämiseksi otettu tarkasteluun kaikkien lämpötila-anturien lämpötilojen ja ratapölkyn siirtymien keskiarvot päivittäin. Ratapölkyn siirtymäantureiden mittausdassissa olevat selvät ongelma- ja epäjatkuvuuskohdat on poistettu. Ratapölkyn routanousua arvioitaessa siirtymäanturien arvot on katsottu ennen talven alkua ja ”nollattu” lokakuun alussa vuosittain. Tämän jälkeen on seurattu ratapölkyn korkeusasemaa talven aikana ratapölkyn routanousun selvittämiseksi. Ratarakenteen lämpötilatietojen perusteella on piirretty roudan syvyys-/ routanousukuvaajat kohteittain. Roudan syvyys-/routanousukuvaajissa on esitetty mittauskohteen havainnot talvittain. Roudan syvyys-/routanousukuvaajissa on esitetty luvussa 5.1.2. Tarvittaessa kuvaajien muotoja on paranneltu muuttamalla yksittäisiä arvoja selkeästi väärin arvojen kohdalla tai muiden epäjatkuvuuskohtien kohdalla. Roudan syvyys/routaraja on interpoloitu syvyydelle, jossa kahden peräkkäisen anturin lämpötila vaihtuu miinukselta plussalle. Tulkituista roudan syvyyksistä ja routanousuista on kerätty talvien maksimiarvot.

Routaantumiselle/routimiselle on laskettu kesto aika vuorokausissa ja roudan etenemistä tulkittaessa on laskettu vuorokausien määrä, joka kuluu tietyn rakennekerroksen routaantumiseen. Myös routanousu on jaettu roudan etenemisen mukaisiin kerroksiin eli on tarkasteltu kuinka paljon routanousua tapahtuu silloin, kun routaraja sijaitsee tietyssä rakennekerroksessa. Roudan etenemisestä kerättiin päivämäärät, jolloin routa etenee tiettyyn kerrokseen ja milloin se mahdollisesti etenee seuraavaan kerrokseen. Roudan etenemiseen ratarakenteessa kerroksittain/ talvittain luotiin seuraavat tulkintasäännöt: talvi alkaa, kun jäätyminen alkaa kerroksessa eli kun ensimmäinen (lähimpänä pintaa oleva) lämpötila-anturi on pysyvästi pakkasella. Seuraavan kerroksen jäätyminen alkaa, kun roudan syvyys on saavuttanut pysyvästi seuraavan kerroksen vähimmäissyvyyden (Routa on siinä kerroksessa vähintään 4 vrk.). Talvi päättyy, kun routa alkaa sulaa pysyvästi pinnasta (ensimmäisen anturin lukema siirtyy nollan yläpuolelle).

Koekohteiden lämpötilagradientit on laskettu kerroksittain. Lämpötilagradientti on pyritty laskemaan mahdollisimman läheltä tutkimuksen kohteena olevan rakennekerroksen puoliväliä kahden lämpötila-anturin havaintojen ja rakennekerrostietojen perusteella.

Mittauskohteiden pohjavedenpinta on arvioitu asennettujen kosteusantureiden avulla, jos pohjavedenpinta ulottuu kosteusantureiden mittausalueelle, muuten pohjavedenpinnan on oletettu sijaitsevan vähintään syvimmän kosteusanturin tai radan ojien pohjan tasalla. Kosteusantureilta kerättiin kosteustietoja radan rakennekerroksista kolmena ajankohtana talvien aikana. Tietoja kerättiin kerroksittain. Alempien rakennekerrosten kosteudet kirjattiin, kun tutkittava kerros alkoi jäätymään, koska jäätyneen kosteusanturi ei näytä enää oikeaa arvoa. Vesipitoisuudet on otettu havaintopäivän mittausarvojen keskiarvona. Ratarakenteen kosteushavainnot on kerätty kerroksittain roudan etenemisen mukaan:

1. Tukikerros, alusrakenne ja pohjamaa (kun tukikerros alkaa jäätymään)
2. Alusrakenne ja pohjamaa (kun alusrakenne alkaa jäätymään)
3. Pohjamaa (kun pohjamaa alkaa jäätymään)

Tutkimuksen ulkopuolelle jätettiin roudan sulaminen ja sulamisen mahdollisesti aiheuttama ratarakenteen sulamispehmeneminen ja ratapölkkyjen vajoaminen.

Kenttämittauskohteiden säähavaintotiedot

Ilmatieteen laitokselta tilattiin viralliset ilmastotiedot koekohteita lähimmiltä sääasemilta kesäkuusta 2008 lähtien toukokuuhun 2012 asti. Kenttämittauskohteita lähimmät säähavaintoasemat on esitetty taulukossa 4.2. Ilmastotietoihin sisältyi vuorokauden keskilämpötila, sademäärä ja lumen syvyys. Säähavaintoasemien mittaamat säähavainnot on esitetty liitteessä 5. Päivittäisten lämpötilatietojen avulla laskettiin talvittain pakkasmäärä ja pakkaskauden pituus. Sademäärätiedoista laskettiin vuotuinen sademäärä ja sademäärä vuosikolmanneksittain. Ensimmäinen vuosikolmannes oli elokuusta marraskuuhun, jotta tiedetään sademäärä ennen ratarakenteen routaantumista. Toinen vuosikolmannes on joulukuusta maaliskuuhun, jolloin tiedetään sademäärä talvikauden aikana ja

kolmas vuosikolmannes on huhtikuusta heinäkuuhun. Ilmastotiedoista laskettiin lämpötilatietoja, hetkellisiä pakkasmääriä ja tehtiin lumen syvyyshavaintoja routarajan etene-
misen mukaan. Koekohteiden ilmastotietoja on käsitelty tarkemmin työn luvussa 5.1.5.

Taulukko 4.2. Kenttämittauskohteet ja niitä lähimmät säähavaintoasemat.

Kenttämittauskohde	Säähavaintoasema
Karkku	Tampere
Kitee	Tohmajärvi
Kuopio	Kuopio
Liminka	Oulu
Mäntsälä	Hyvinkää
Paltamo	Kajaani
Tornio 899	Tornio
Tornio 909	Tornio
Tornio 921	Tornio
Tornio 925	Tornio
Tornio 932	Tornio
Tornio 945	Tornio
Varkaus	Varkaus
Viiala	Tampere

Säähavaintotiedoista laskettiin tietoja ajanjaksoittain, jolloin routa etenee kerrokselta toiseen. Tiedot laskettiin vain jäätymisvaiheesta. Tietoja kerättiin kerroksittain keskilämpötiloista, kertyneestä pakkasmäärästä, pakkasmäärästä, kun routa on tutkittavassa kerroksessa ja kertyneestä lumikerroksen paksuudesta.

Koekohteilla oli myös ilman lämpötila-anturit, mutta mittaustulosten varmistamiseksi ja vertailun vuoksi haluttiin saada myös viralliset säähavaintotiedot Ilmatieteen laitokselta. Vertailemalla roudan monitorointiasemilta mitattuja ilmastotietoja Ilmatieteen laitoksen ilmoittamiin virallisiin säähavaintoihin päädyttiin käyttämään Ilmatieteen laitoksen virallisia säähavaintoja, jotta keskilämpötilojen, pakkasmäärien ja lämpötila-gradienttien arvot olisivat luotettavia.

4.3 Näytteet ja näytteenotto

Radan rakennenäytteet otettiin roudan monitorointiasemilta marras- ja joulukuun vaihteessa vuonna 2011. Ainoastaan Tornio-Kolari rataosalla olevilta Tornio 899 ja Tornio 909 sekä Mäntsälän roudan monitorointiasemalta ei ollut radan rakennenäytteitä. Näytteitä otettiin pohjamaasta, alusrakennekerroksesta ja tukikerroksesta. Väli- ja eristyskerrosmateriaalien havaittiin näytteenoton yhteydessä samankaltaisiksi. Tällä perusteella alusrakennekerroksesta päätettiin käsitellä yhtenä kokonaisuutena. Tutkimuksessa hyödynnettiin aiemman tutkimuksen. (Hietala et al. 2010) routakoe- ja näytetuloksia. Aiemmassa tutkimuksessa tutkittiin Tornio-Kolari rataosuudelta otettujen rakennekerrosmate-

riaalinäytteiden routimisherkkyyttä. Näistä oli olemassa valmiit routanousukoetulokset, jotka sopivat roudan mallinnustutkimukseen.

Radan rakennekerrosnäytteet otettiin ikkunanäytteenottomella ja RC-1400 näytteenottolaitteistolla. Näytteet otettiin halkaisijaltaan 100 mm näyteputkella, joka iskettiin ratarakenteen läpi. Kuvassa 4.3 on esitetty radan rakennekerrosten materiaalinäytteiden otossa käytetty ikkunanäytteenotin. (RC-infra 2012)

Routanousukokeen jälkeen näytteet seulottiin ja niiden rakeisuusjakaumat määritettiin. Näytteiden rakeisuusjakaumat on esitetty liitteessä 1 lukuun ottamatta aiemmassa tutkimuksessa esitettyjä Tornion kohteiden rakeisuuksia.



Kuva 4.3. Näytteenottolaitteisto, jonka oikealla puolella maassa on 100 mm näyteputket (RC-infra 2012).

4.4 Routanousukoe

4.4.1 Routanousukoe-kappaleiden valmistus

Routakokeissa käytettiin kuivattuja ja seulottuja tukikerros ja alusrakennemateriaaleja. Tukikerros- ja alusrakennenäytteistä oli seulottu yli 31,5 mm rakeet pois. Pohjamaa-näytteet olivat seulomattomia ja luonnollisessa kosteustilassa.

Materiaalien rakeisuuskäyriä tutkimalla päätettiin jokaiselle näytteelle tavoite-kosteus, jossa routanousukoenäytteet tiivistettiin. Tavoitevesipitoisuudet vaihtelivat

tukikerros- ja alusrakennenäytteillä 3-5 % välillä. Tämän jälkeen pääteltiin materiaalin todennäköinen tiiviystila tiivistyksen jälkeen, jotta osattiin arvioida tarvittava oikea materiaalmäärä näytemuottiin, koska näytteestä tavoiteltiin mahdollisimman tarkasti 150 mm korkeita.

Kuivaa materiaalia varattiin 5700–6500 g ja tähän lisättiin haluttu vesimäärä. Materiaali ja vesi sekoitettiin hyvin, jotta näytteestä tuli kosteudeltaan tasalaatuinen. Seuraavaksi valmisteltiin näytemuotti, joka koostui paloittelusta sisähalkaisijaltaan 150 mm PVC putkesta. Routakokeessa käytettiin paloittelua PVC putkea, jotta vältettiin yhtenäisen putken aiheuttama kitka näytteen ja muotin välillä. Kosteaa materiaalia laitettiin kerroksittain näytemuottiin välillä punnuksella painellen. Näytteet tiivistettiin Intensive Compactor Tester – 150RB (ICT) - kiertotiivistinlaitteessa kiertämällä näytettä 50 kierrosta 6 barin työpaineella. Pohjamaanäytteitä tiivistettiin vähemmällä kierrosmäärällä liettymisen estämiseksi. Lopullisten näytteiden korkeudet vaihtelivat 140–160 mm välillä. Kuvassa 4.4 on routanousukoe-kappaleiden tiivistämiseen käytetty ICT-kiertotiivistinlaite ja paloittelu näytemuotti, johon materiaalinäyte tiivistettiin.

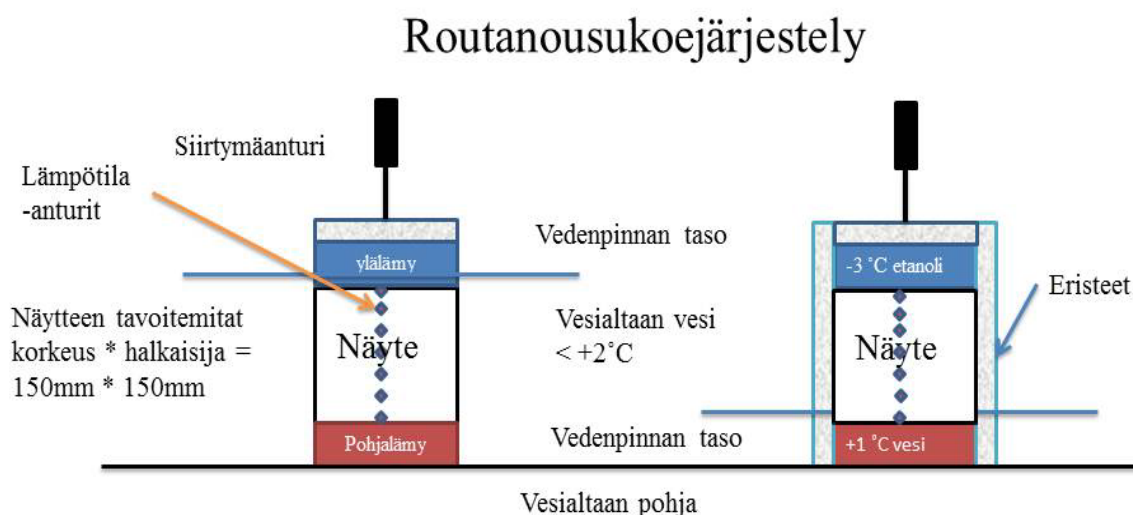


Kuva 4.4. Intensive Compactor Tester – 150RB (ICT) – kiertotiivistinlaite ja paloittelu näytemuotti.

4.4.2 Routanousukoejärjestely

Routanousukokeessa tutkitaan maa-ainesten routimisherkkyyttä laboratorio-olosuhteissa jäljittelemällä luonnollista materiaalin routaantumislmiötä. Routanousukokeella ei ole standardoitua koemenettelyä vaan koejärjestelyt vaihtelevat, jonka takia tutkimustulosten vertailu on hankalaa. Tässä tutkimuksessa käytettiin koejärjestelyä, joka on ollut käytössä ratarakennemateriaalien laajoissa tutkimuksissa Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä.

Routanousukoelaitteistolla voidaan tutkia samanaikaisesti neljä näytettä. Aluksi näytteet asetellaan laitteistoon jäätymis- ja sulanapitoelementin väliin. Seuraavaksi näytteisiin kiinnitetään seitsemän kalibroitua termolanka-anturia. Anturit sijaitsevat 25 mm välein näytemuottiin poratuissa rei'issä, joiden kautta anturit ovat suorassa kosketuksessa näytemateriaalin kanssa. Kunkin näytteen yläpuolella sijaitsee siirtymäanturi, joka tässä kokeessa mittaa routanousua. Routanousua vastusti ainoastaan ylämäntien painosta aiheutuva 3 kPa paine. Routanousukoejärjestely on esitetty kuvassa 4.5.

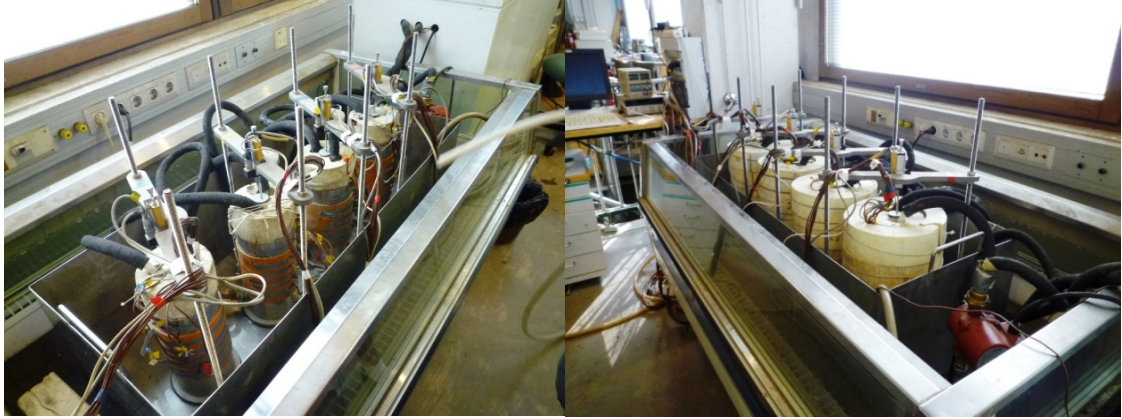


Kyllästysvaihe 1 vrk.

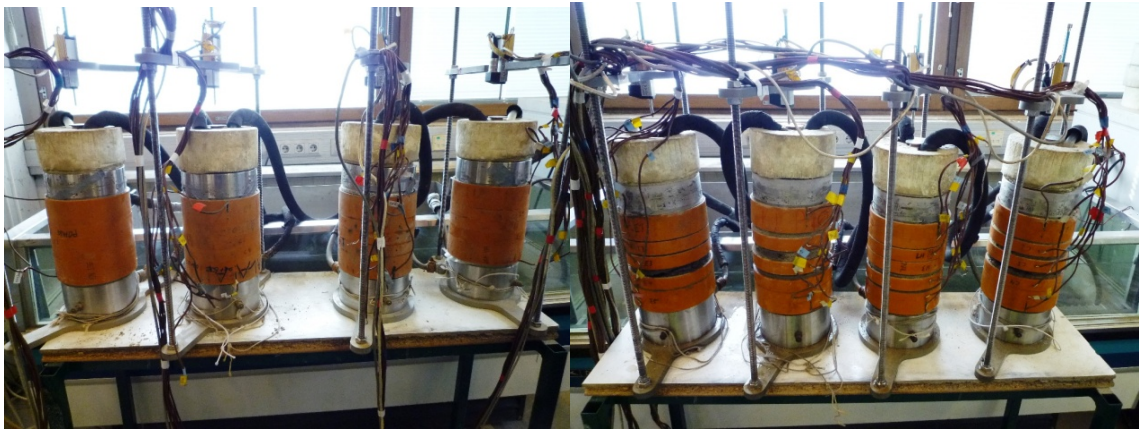
Jäädytysvaihe 4 vrk.

Kuva 4.5. Routanousukokeen koejärjestely.

Koe käynnistyi näytteiden kyllästämällä, joka tehtiin täyttämällä routakoelaitteiston allas vedellä ja jäädyttämällä vesi 1-2 asteeseen. Kyllästysvaihe kesti noin vuorokauden, jonka jälkeen altaan veden pinnan taso laskettiin 12 mm näytteiden alapinnan yläpuolelle, millä turvattiin näytteiden lisäveden saanti. Näytteet eristettiin radiaalisten lämpövirtausten minimoimiseksi. Seuraavaksi aloitettiin näytteiden jäädytysvaihe jäädyttämällä näytteet luonnollisessa jäätymissuunnassa ylhäältä alaspäin. Näytteiden jäädytys tapahtui tietokoneohjatusti johtamalla toisen pakastimen jäädyttämää -3 asteista jäädytysnestettä näytteiden ylämäntiin ja pitämällä näytteiden alapään +1 asteen lämpötilassa pakastimen lämpötilaa säätämällä ja vedenkierron avulla. Näytteiden lämpötiloja ja routanousuja mitattiin minuutin välein ja ne tallentuivat tietokoneelle viiden minuutin välein. Jäädytysvaihe kesti vähintään neljä vuorokautta. Kuvassa 4.6 on esitetty tilanne routanousukokeen kyllästysvaiheen ja jäädytysvaiheen aloitushetkeltä. Kuvasta 4.7 havaitaan pohjamaanäytteiden suuri routivuus, kun vertaillaan näytteistä otettuja kuvia ennen routanousukoetta ja sen jälkeen.



Kuva 4.6. Vasemmalla kuva näytteiden kyllästysvaiheesta, jossa veden pintaa aletaan nostaa. oikeanpuoleisessa kuvassa 4 vuorokauden jäädytysvaihe on alkanut ja näytteiden ympärille on asennettu radiaalisia lämpövirtauksia estävät eristeet.



Kuva 4.7. Routivia pohjamaanäytteitä ennen routanousukoetta ja sen jälkeen.

Jäädytysvaiheen päätyttyä mittauslaitteisto sammutettiin ja koetulokset tallennettiin. Koekappaleet irrotettiin koelaitteistosta vesipitoisuuksien selvittämistä varten. Koekappaleet jaettiin kerroksittain kolmeen osaan niin pian kuin mahdollista kokeen päättymisen jälkeen. Jäätyneiden koekappaleiden jako kolmeen osaan vaati voimakeinojen sekä vasaran ja taltan käyttöä, jotta jako onnistuisi ilman, että koekappale ehti sulaa ja siihen sitoutunut vesi valua näytteen alempiin kerroksiin tai kokonaan näytteestä pois. Koekappale pyrittiin jakamaan tasasuuriin osiin. Koekappaleesta irrotettu alin näyte oli pääsääntöisesti koekappaleen jäätymätön osa ja keskimäinen sekä ylin näyte olivat koekappaleen jäätyneen osan puolikkaita. Koekappaleen kolmeen osaan jaon jälkeen näytteet punnittiin ja painot kirjattiin ylös. Näytteet kuivattiin, jonka jälkeen ne punnittiin. Näytteiden märkä- ja kuivapainoja vertailemalla saatiin selville kerrosten vesipitoisuudet eli selvitettiin, miten vesi oli jakautunut koekappaleeseen routakokeessa.

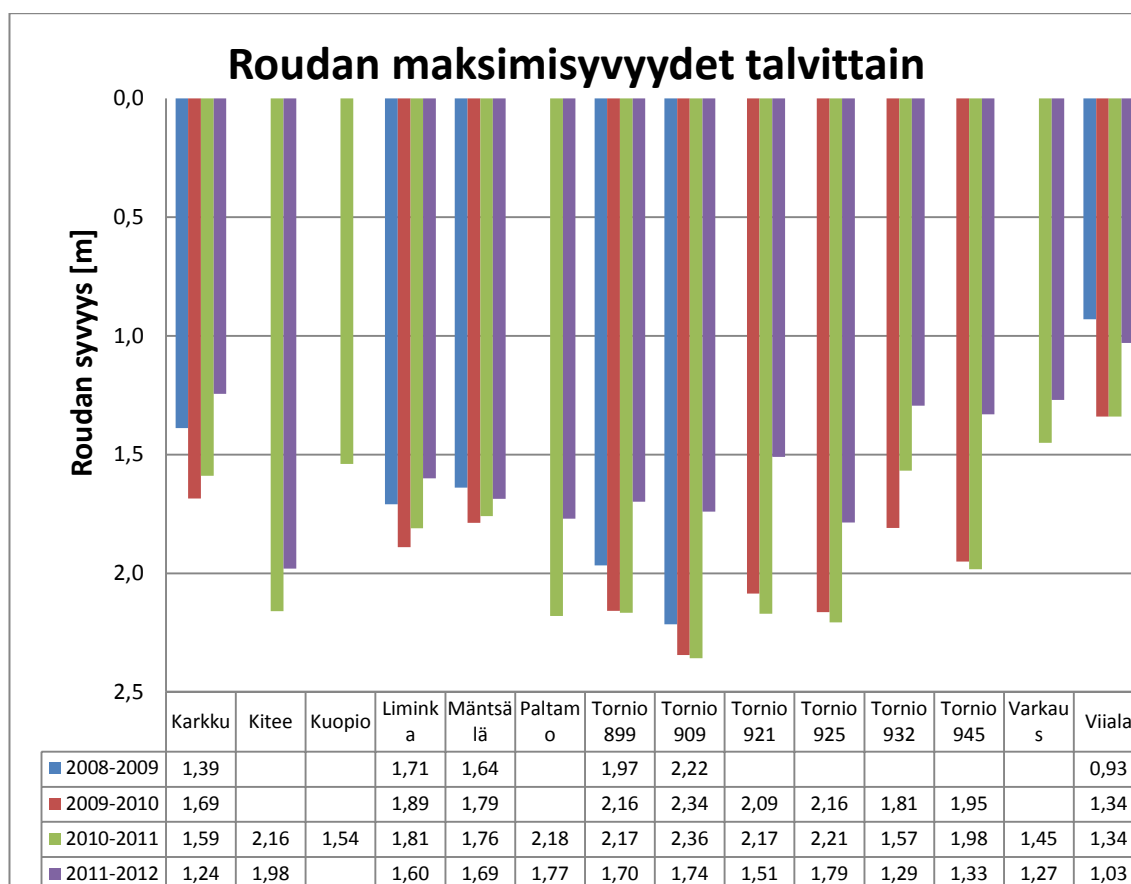
5 TUTKIMUSTULOKSET

5.1 Kenttämittaukset

5.1.1 Koekohteiden roudan maksimisyvyys talvittain

Roudan monitorointiasemilta kerättyjen lämpötilatietojen avulla selvitetiin kohteiden routarajan syvyys ja routarajan syvyystiedoista kerättiin tiedot kohteiden roudan maksimisyvyydestä talven aikana. Koekohteiden roudan maksimisyvyys talven aikana on esitetty kuvaajassa 5.1. Roudan maksimisyvyys kertoo pakkasmäärän ohella paljon talven ankaruudesta ja roudan seurantakohteen routaolosuhteista.

Kuvaajasta havaitaan Pohjois-Suomen seurantakohteilla syvälle tunkeutuva routa verrattuna Etelä-Suomen kohteisiin. Torniossa ja Paltamossa routa etenee ankarina talvina reilusti yli kahden metrin syvyydelle, kun Viialassa jäädytään reilusti alle puolentoista metrin syvyydelle.



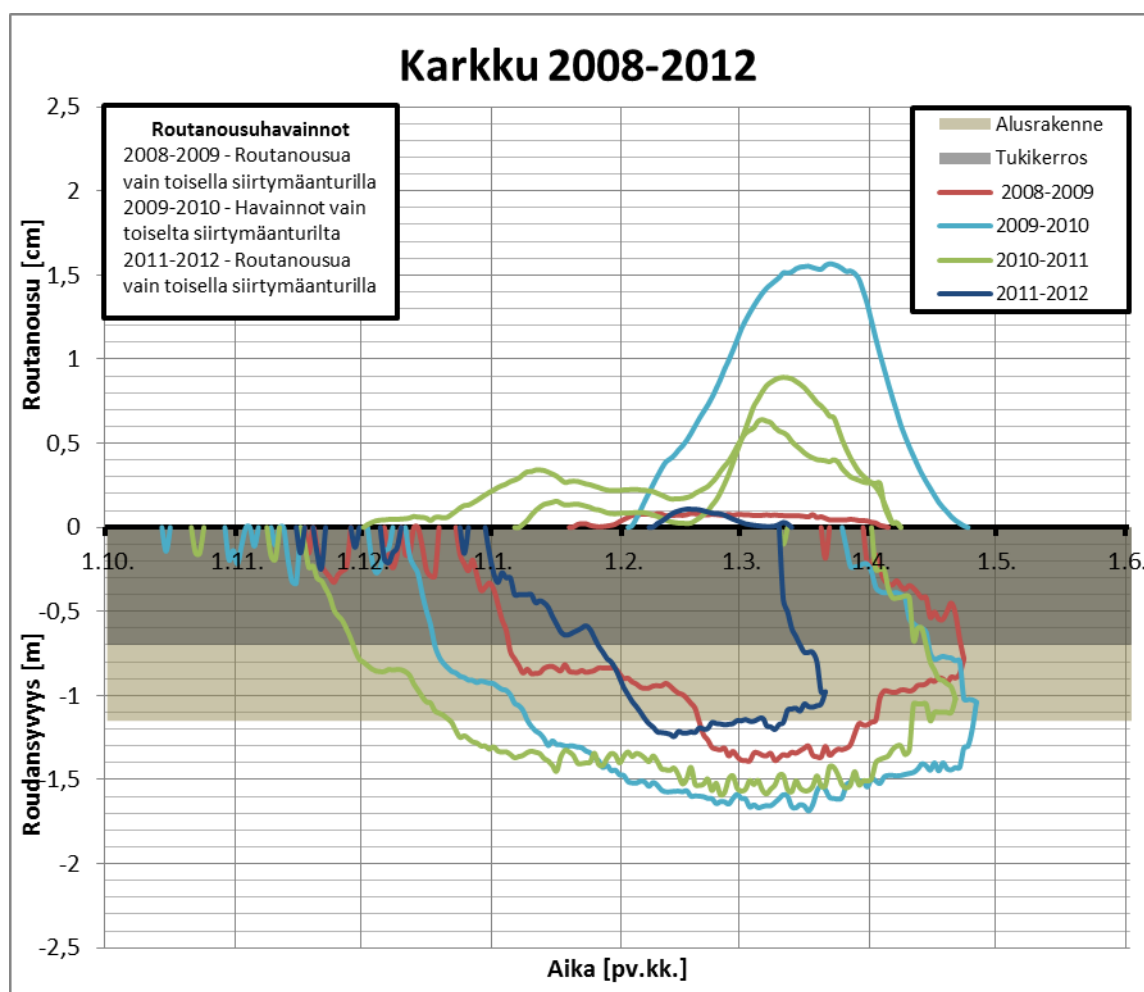
Kuva 5.1. Roudan maksimisyvyys seurantakohteittain.

5.1.2 Koekohteiden roudan syvyys-/routanousukuvaajat

Karkku

Karkun havaintokohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.2. Karkussa on selkeästi routiva pohjamaa. Kun routa etenee alusrakennekerroksesta pohjamaahan, alkaa syntyä routanousua. Talvina 2009–2010 ja 2010–2011 on syntynyt selkeästi suurimmat routanousut. Talvena 2009–2010 routa on edennyt hieman talvea 2010–2011 syvemmälle, josta on aiheutunut selkeästi suurempi routanousu, vaikka molempina talvina routa on ollut yhtä kauan pohjamaassa. Talvet 2008–2009 ja 2011–2012 eivät ole aiheuttanut pahoja routanousuja. Routanousujen alettua talvena 2010–2011 roudan syvyys on selkeästi vakiintunut pitkäksi aikaa. Kun routa on alkanut jälleen edetä syvemmälle pohjamaahan, myös routanousu on alkanut kasvaa nopeammin, mikä johtuu todennäköisesti uuden jäälinsikerroksen syntymisestä syvemmälle pohjamaahan. Talvien jälkeen routa on lähtenyt sulamaan pinnasta nopeasti ja routa on sulanut hieman myös syvältä ratarakenteesta pintaan päin. Routa on sulanut kuukaudessa kokonaan.

Karkun koekohteessa routiminen aiheutuu pohjamaasta ja routimista on tapahtunut ohuesta rakennekerrospaksuudesta johtuen joka vuosi.

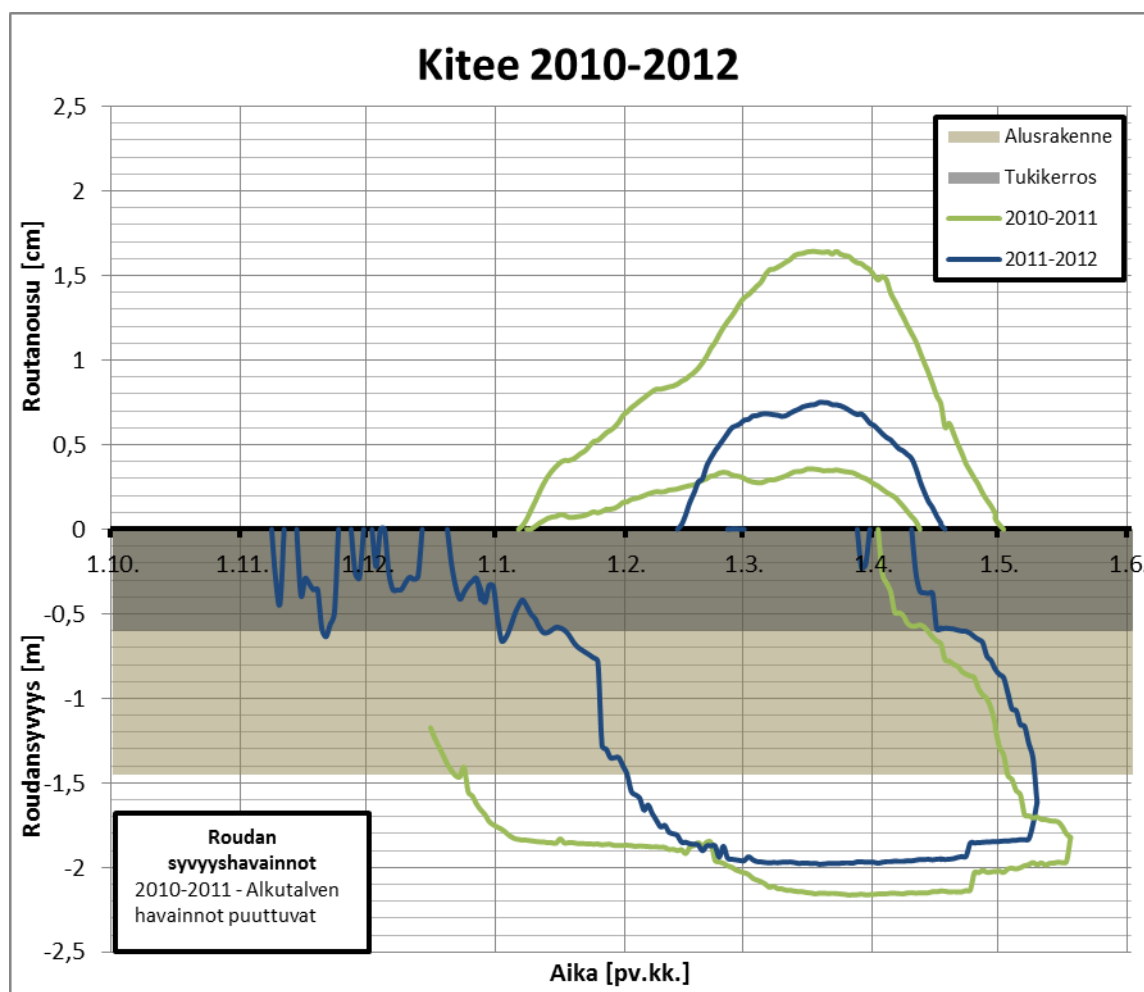


Kuva 5.2. Karkun koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Kitee

Kiteen koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.3. Kiteellä havaitaan suuria routanousuja erityisesti talvena 2010–2011. Routanousu ei ole ollut ratapölkkyjen päiden välillä tasaista vaan toinen pää on noussut noin 12 mm ylemmäs aiheuttaen virhettä raidegeometriaan. Routanousut syntyvät Kiteellä pari viikkoa sen ajankohdan jälkeen, jolloin routa on edennyt routivaan pohjamaahan. Routa on edennyt talvena 2010–2011 nopeasti radan rakennekerrosten läpi ja eteneminen on hidastunut vasta 1,8 metrin syvyydellä, jolloin routiminen on alkanut. Routa pysyy kauan samalla syvyydellä, mutta helmikuun lopussa routa etenee yli 2,1 metrin syvyydelle, jolloin routanousu lähtee myös kasvamaan nopeammin uuden jäälinssin muodostuttua syvemmälle pohjamaahan. Routanousun kasvaminen loppuu, kun routa alkaa sulaa pinnasta. Kiteellä roudan sulaminen tapahtuu suurimmaksi osaksi pinnasta päin.

Kiteen koekohteessa routiminen aiheutuu pohjamaasta ja routimista on tapahtunut ohuesta rakennekerrospaksuudesta johtuen joka vuosi.

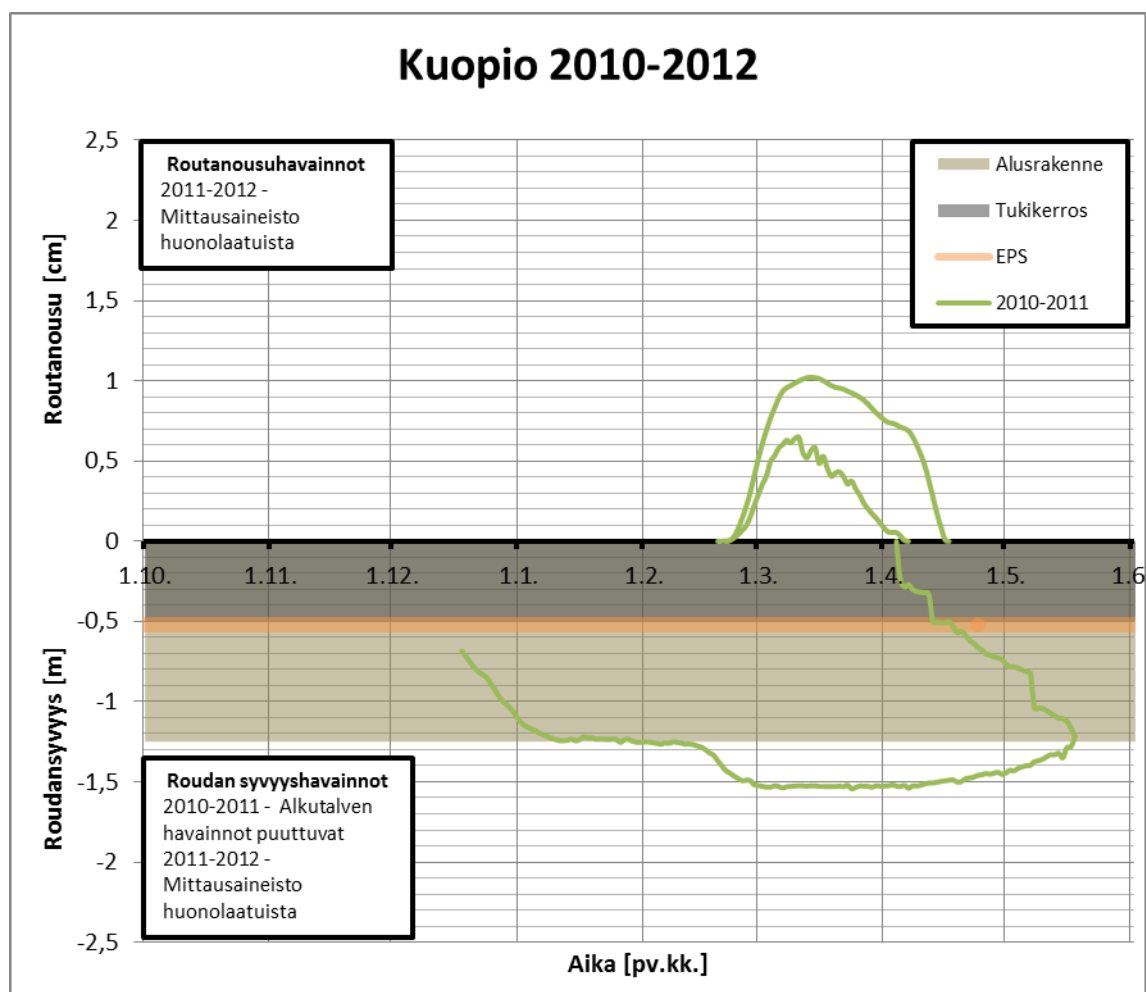


Kuva 5.3. Kiteen koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Kuopio

Kuopion koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.4. Kuopion roudan monitorointiasemalta esitetään ainoastaan havainnot talvelta 2010–2011, koska seuraavalta talvelta ei ole luotettavia havaintoja laitevian takia muuta kuin alkutalvelta. Kohteella syntyy routanousua, kun routa etenee routivaan pohjamaahan. Routanousu kasvaa roudan ollessa 1,5 metrin syvyydellä, mutta alkaa laskea jo ennen kuin routa alkaa sulaa pinnasta ja roudan ollessa edelleen 1,5 metrin syvyydellä.

Kuopion koekohteessa routiminen aiheutuu pohjamaasta ja routimista on tapahtunut ohuesta rakennekerrospaksuudesta johtuen.

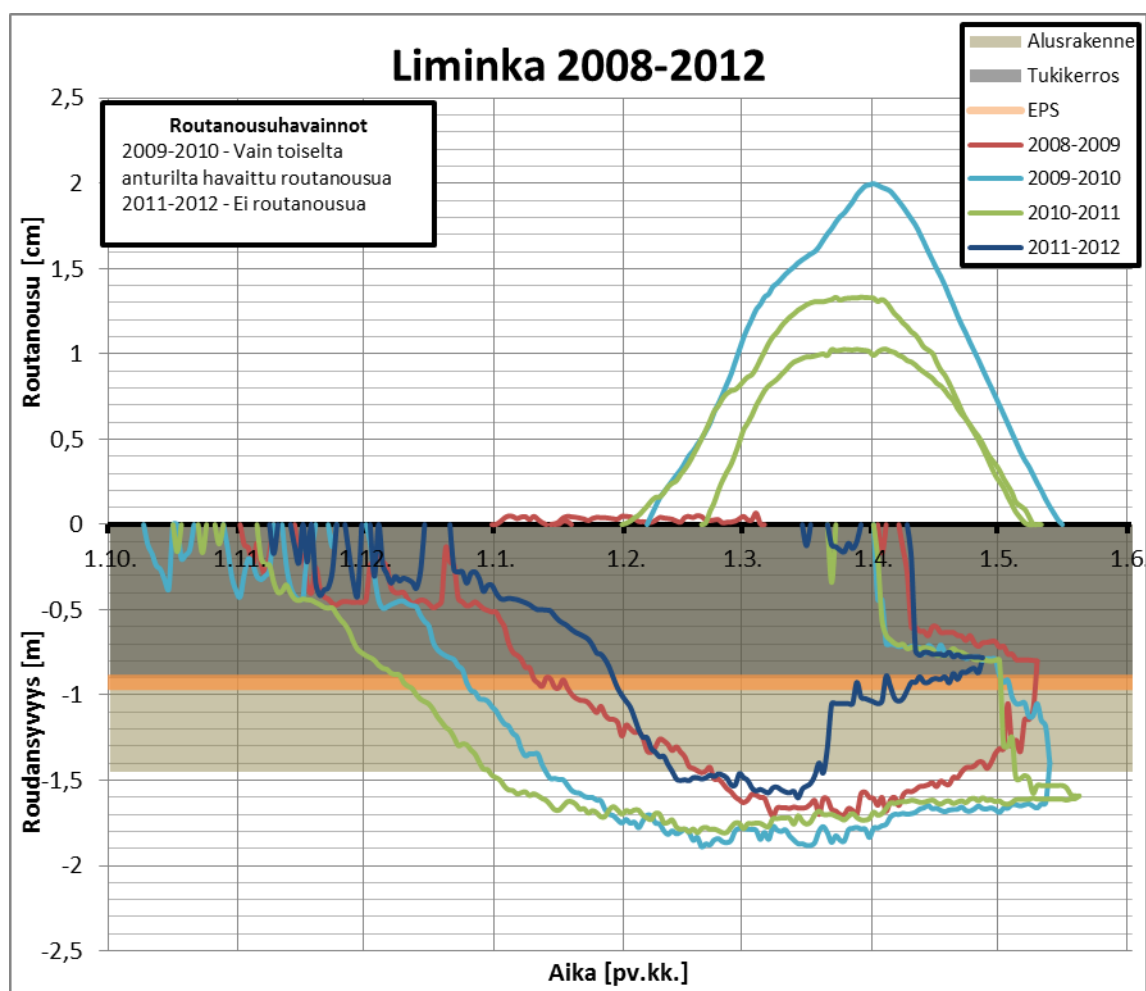


Kuva 5.4. Kuopion koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Liminka

Limingan koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.5. Limingan roudan monitorointiasemalla havaitaan merkittäviä routanousuja ankarampina talvina 2009–2010 ja 2010–2011, jolloin routa on tunkeutunut pohjamaahan yli 1,8 metrin syvyydelle. Routanousut ovat alkaneet, kun routa on tunkeutunut 1,7 metrin syvyydelle, paitsi talvena 2008–2009 on tapahtunut hyvin vähäistä routanousua jo alkutalvella tammikuusta alkaen, jolloin routa on ollut vasta tukikerroksen puolivälissä 0,5 metrin syvyydellä. Ankarampien talvien routanousut ovat kasvaneet tasaisesti roudan pysyessä noin 1,7 metrin syvyydellä, jolloin on syntynyt 10–20 mm routanousua.

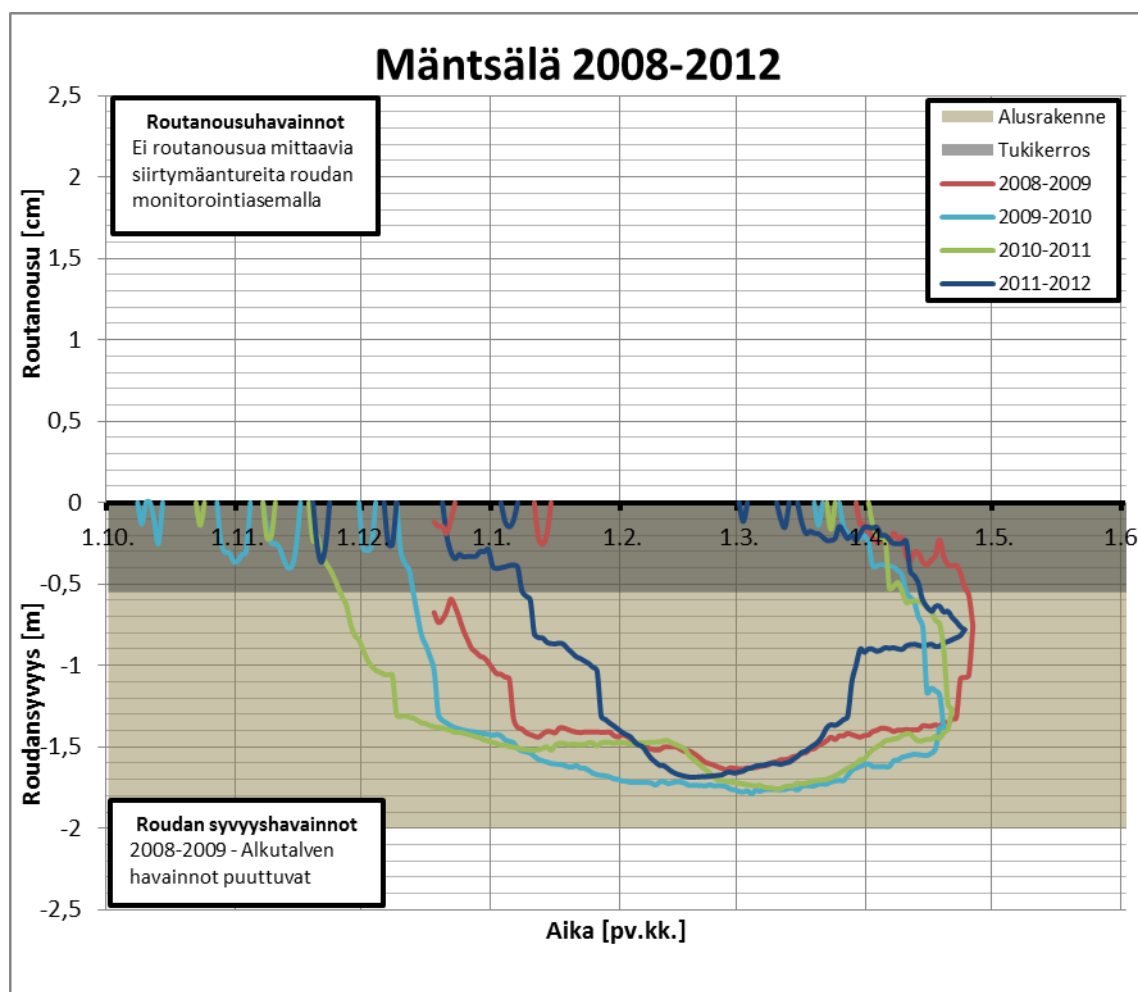
Limingan koekohteessa routiminen aiheutuu pohjamaasta ja routimista tapahtuu ohuesta rakennekerrospaksuudesta johtuen useana vuotena. Kun routa etenee pohjamaassa 1,8 metrin syvyydellä olevaan routivaan kerrokseen, syntyy merkittäviä routanousuja.



Kuva 5.5. Limingan koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Mäntsälä

Mäntsälän koekohteella havaitut roudan syvyydet on esitetty kuvassa 5.7. Mäntsälässä ei ole asennettu siirtymäantureita ratapölkkyyn, joten siellä ei pystytä mittamaan roudan aiheuttamia routanousuja. Routa on edennyt jokaisena havaintotalvena samalle maksimisyvyydelle noin 1,7–1,8 metriin. Routa on pysynyt jokaisena talvena selkeästi radan rakennekerroksissa, josta voidaan päätellä radan mahdollisen routimisen olevan vähäistä tai johtuvan ainoastaan in-situ routimisesta.

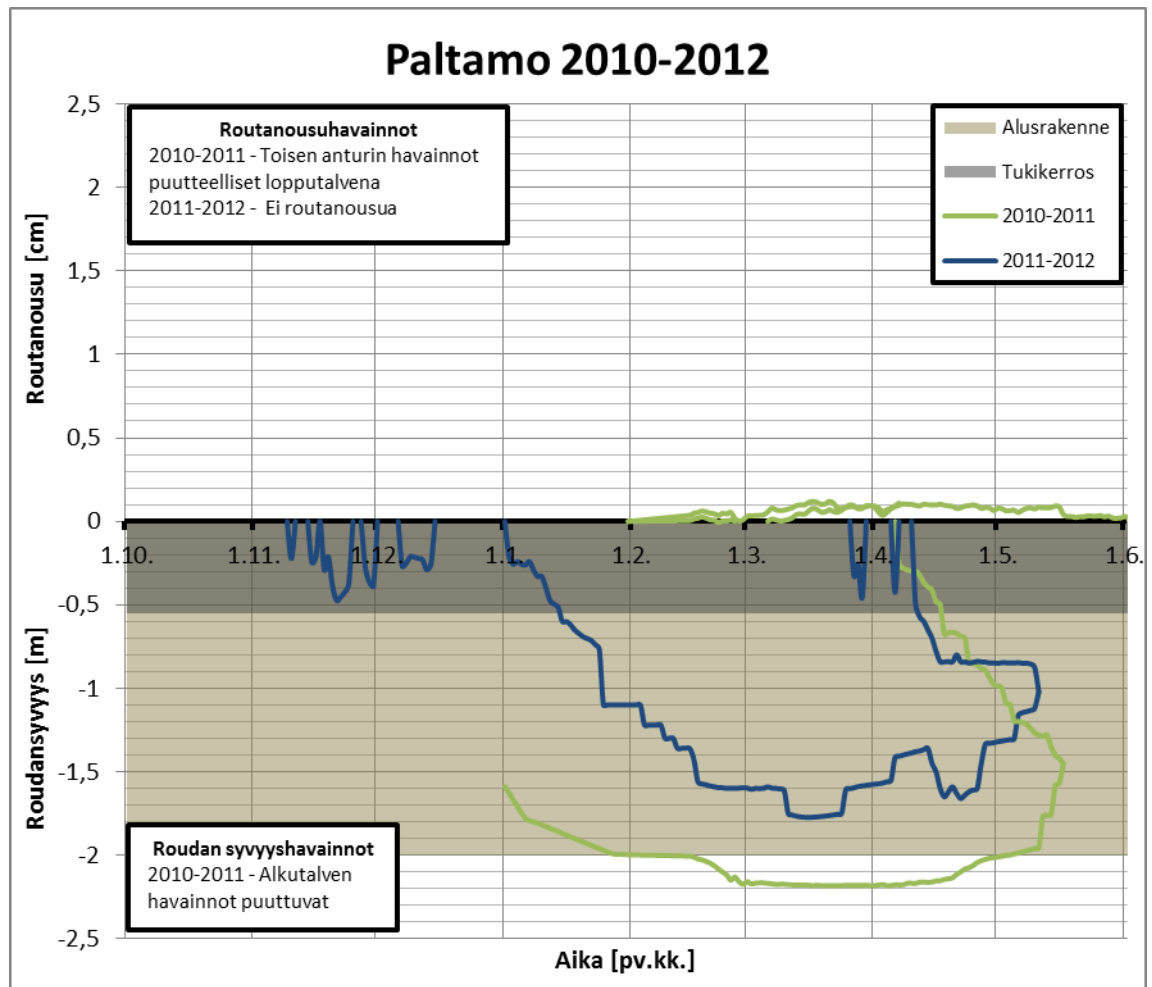


Kuva 5.6. Mäntsälän koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Paltamo

Paltamon koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.6. Paltamon roudan monitorointiasemalla havaitaan routanousuja, kun routa etenee alusrakennekerroksen ja pohjamaan rajapinnalle kahden metrin syvyydelle.

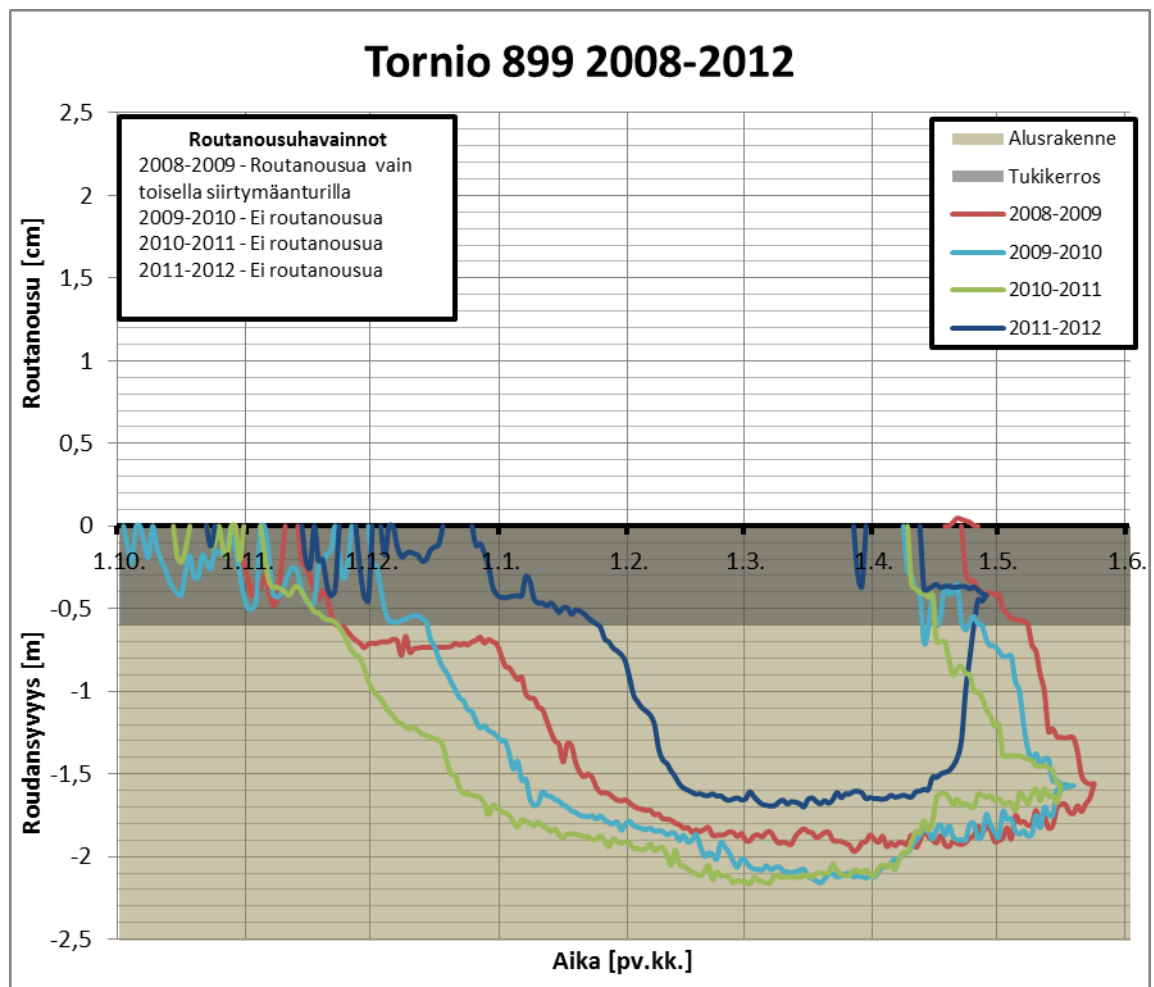
Talven 2010–2011 havainnoissa on mittaushäiriö toisessa routanousuja mittaavassa siirtymäanturissa huhtikuun jälkeen, jonka takia routanousukuvaaja on puutteellinen.



Kuva 5.7. Paltamon koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Tornio 899

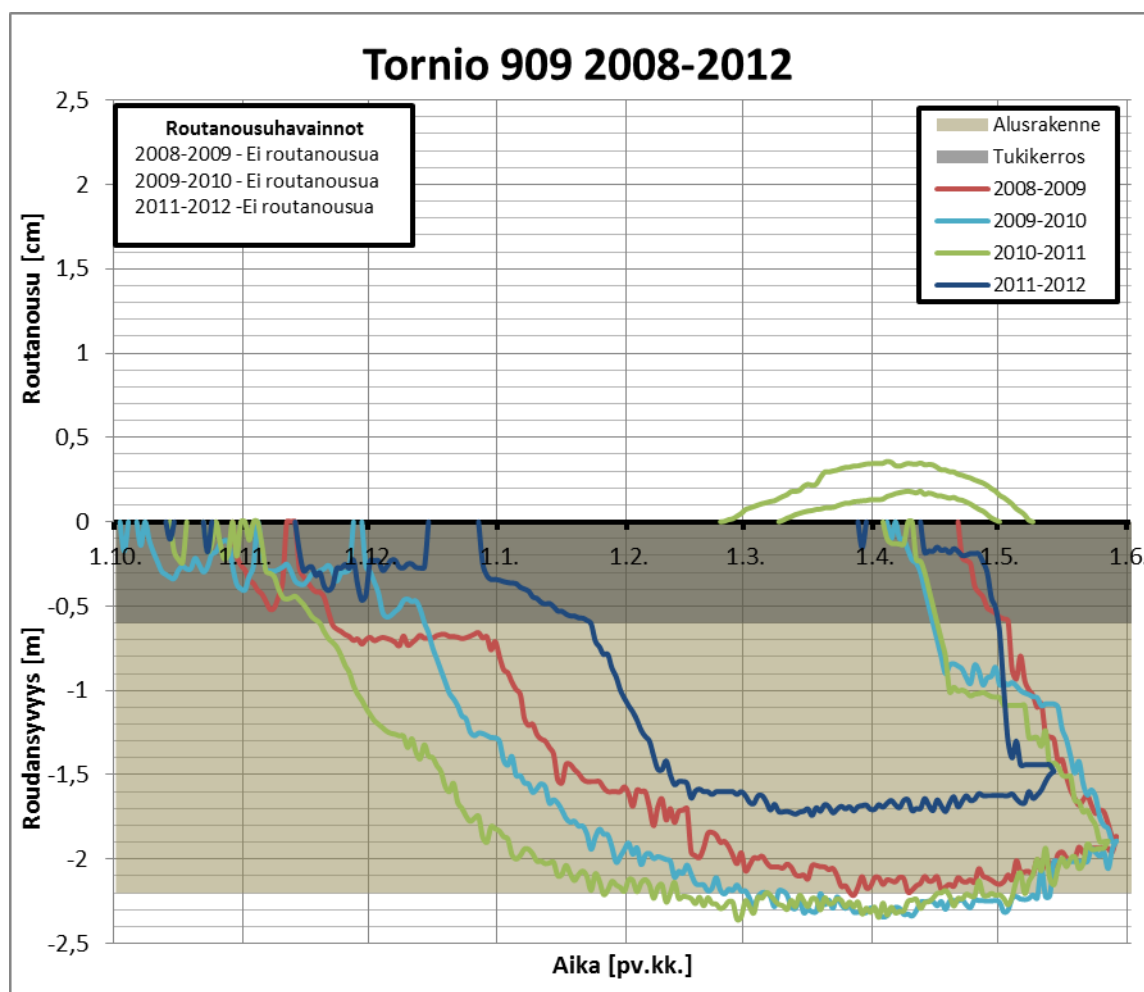
Tornion ratakilometrin 899 koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.8. Tornio 899 roudan monitorointiasema on ollut mittaustulosten perusteella neljänä havaintotalvena käytännössä routimaton. Ainoastaan talvena 2008–2009 havaitaan pieni routanousu huhtikuun lopussa, kun routa on ollut pitkään maksimisyydydellä mutta on merkityksetön radan toiminnan kannalta. Havainnointikohdassa radan rakennekerrosten paksuus riittää hyvin estämään roudan tunkeutumisen pohjaan normaalina talvina sillä havainnointitalvista ankarimman aikana routa etenee vain alle 2,2 metrin syvyydelle, kun kohdassa on 2,6 metrin kokonaisrakennepaksuus. Routaantunut ratarakenne sulaa lähes täysin pinnasta päin.



Kuva 5.8. Tornio 899 koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Tornio 909

Tornion ratakilometrin 909 koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.9. Tornio 909 roudan monitorointiasemalla havaitaan routanousua ainoastaan talvena 2010–2011. Routanousu on alkanut syntyä, kun routa on edennyt pohjamaahan 2,2 metrin syvyydelle, josta routa on edennyt enää hieman maksimisyydelle 2,3 metriä ja pysynyt sillä tasolla aiheuttaen talven routanousun. Routaraja pysyy leutoina talvina ratarakenteiden kerroksissa, mutta ankarampina talvina routa näyttää tunkeutuvan pohjamaahan, jossa on routiva kerros. Routaantunut ratarakenne sulaa lähes täysin pinnasta päin.

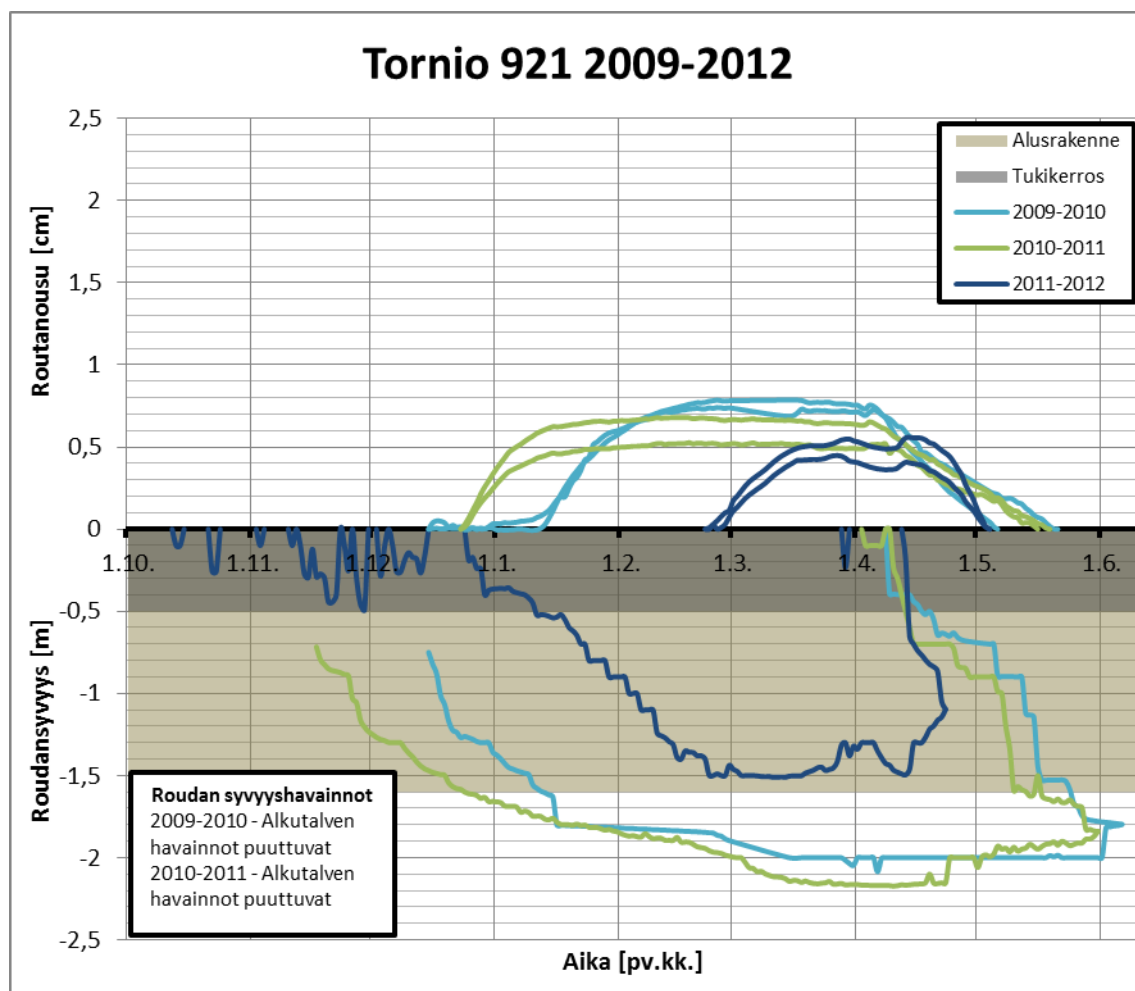


Kuva 5.9. *Tornio 909 koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.*

Tornio 921

Tornion ratakilometrin 921 koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.10. Tornio 921 roudan monitorointiasemalla havaitaan joka talvi lähes samansuuruinen routanousu, joka alkaa silloin kun routa on tunkeutunut 1,5 metrin syvyydelle. Routanousuista päätellen alusrakennekerroksen alaosa on selkeästi routivaa. Vaikka talvena 2010–2011 routa tunkeutuu lähes 0,7 metriä 2011–2012 talvea syvemmälle maksimi routanousu on molempina talvina samaa suuruusluokkaa. Routanousu on ollut ratapölkyn molemmissa päissä lähes identtistä jokaisena talvena, jolloin routanousu ei aiheuta raiteen kierousvirhettä. Ratarakenne sulaa keväällä nopeasti pinnasta alkaen.

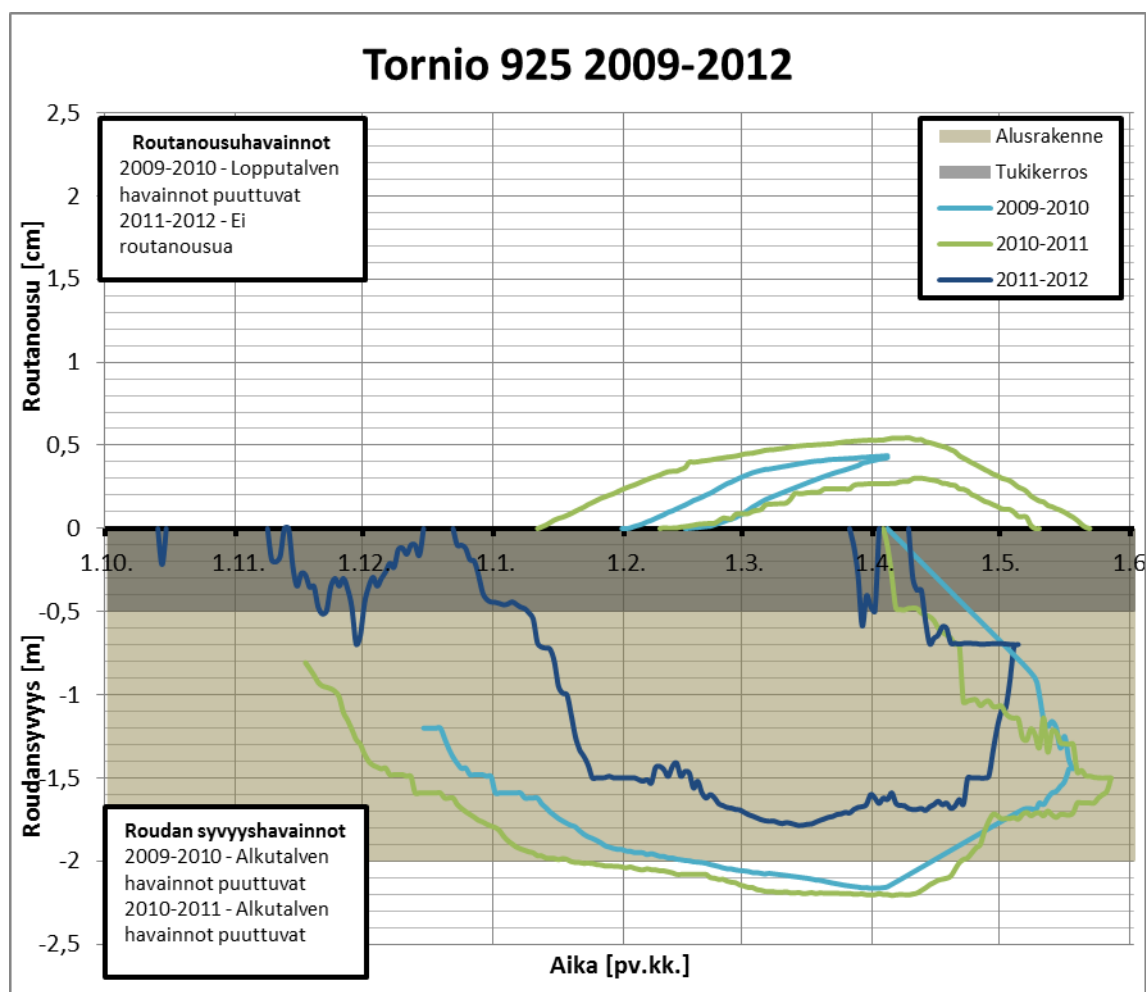
Tornion 921 koekohteessa routiminen aiheutuu pohjamaasta ja routimista tapahtuu ohuesta rakennekerrospaksuudesta johtuen joka vuosi, koska routa on edennyt useasti ratarakennekerroksia syvemmälle pohjamaahan.



Kuva 5.10 Tornio 921 koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Tornio 925

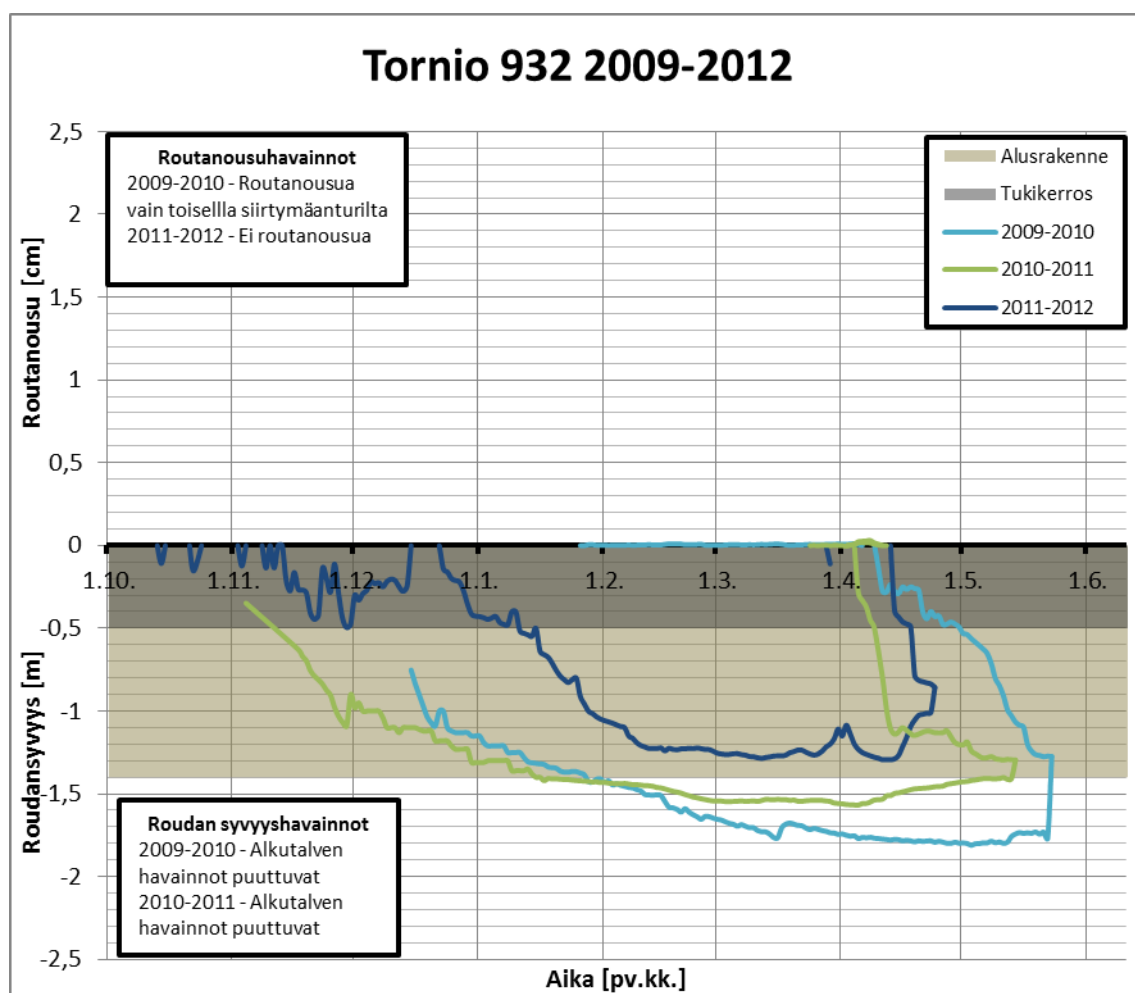
Tornion ratakilometrin 925 koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.11. Tornio 925 roudan monitorointiasemalla havaitaan selkeät routanousut kahtena ankarana talvena 2009–2010 ja 2010–2011. Routanousut syntyvät, kun routa etenee 2 metrin syvyydeltä alkavaan pohjamaakerrokseen. Talvelta 2009–2010 ei ole mittaushäiriön takia selkeitä siirtymäantureiden havaintoja huhtikuun ja toukokuun ajalta. Routanousut syntyvät eri aikaan ratapölkyn eri päissä. Talvena 2010–2011 ratapölkyn päistä havaittavien routanousujen alkamisessa on lähes kuukauden ero, jota voivat selittää paikalliset olosuhteet tai eripaksuiset rakennekerrokset radan eri puolilla.



Kuva 5.11. Tornio 925 koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Tornio 932

Tornion ratakilometrin 932 koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.12. Tornio 932 roudan monitorointiasemalla on mitattu havaintotalvien aikana vain merkityksellömän pieniä routanousuja. Routanousut ovat kaikkina talvina alle yhden millimetrin routanousuja, vaikka ratarakenteen rakennekerrokset ulottuvat vain 1,4 metrin syvyydelle ja routa tunkeutuu 1,8 metrin syvyydelle tällä kohteella ankarimpana talvena 2009–2010. Roudan syvyys jää tällä monitorointiasemalla selvästi muita Tornion kohteita matalammalle, mikä saattaa johtua kohteen paikallisista olosuhteista, kuten korkealla olevasta pohjavedestä, joka luovuttaa tehokkaasti lämpöä ratarakenteeseen. Kohteen pohjamaamateriaalin voidaan olettaa routimattomaksi alle 1,8 metrin syvyydellä, koska kohteella ei ole syntynyt routanousuja, vaikka kohteella on vesipitoisuustietojen perusteella vettä saatavilla ja suuri pakkasmäärä.

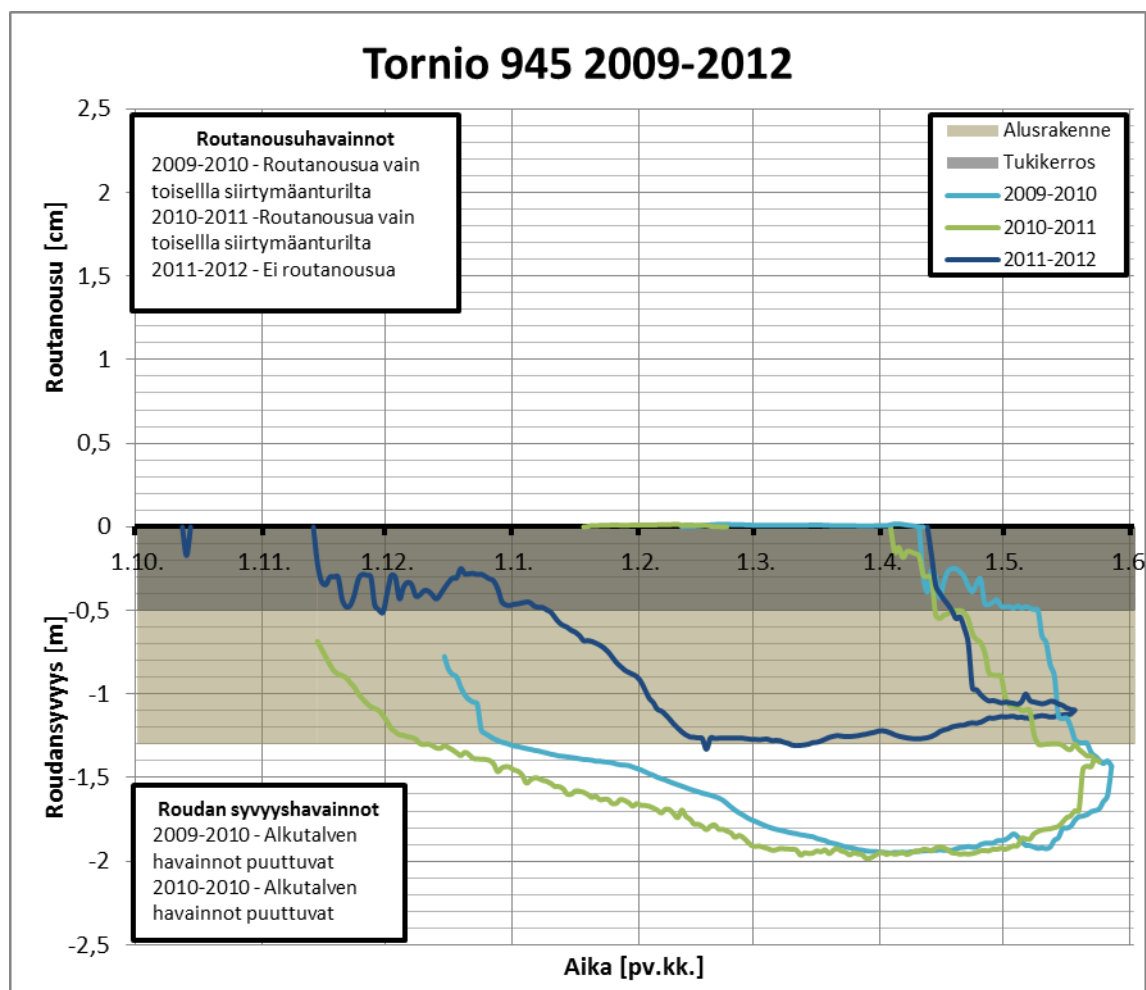


Kuva 5.12. Tornio 932 koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Tornio 945

Tornion ratakilometrin 945 koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.13. Tornio 945 roudan monitorointiasemalla havaitaan erittäin pientä routanousua kahtena ankarampana talvena 2009–2010 ja 2010–2011. Routanousut tapahtuvat, kun routa tunkeutuu 1,6 metrin syvyydelle. Routanousut ovat suuruudeltaan merkityksettömiä.

Tornion 945 koekohteella on matalat rakennekerrospaksuudet, mutta alusrakennekerrosten alapuoliset materiaalit ovat käytännössä lähes routimattomia.

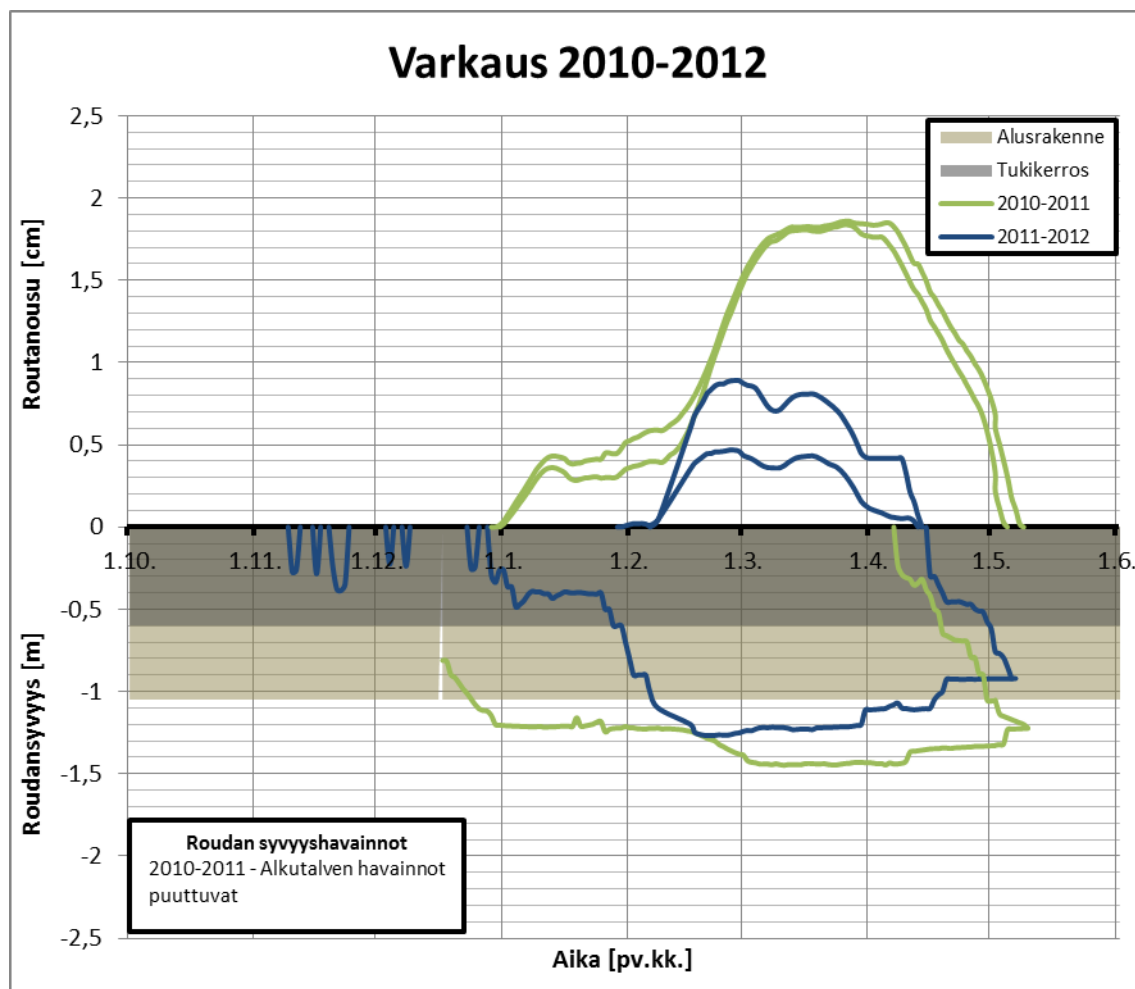


Kuva 5.13. Tornio 945 koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Varkaus

Varkauden koekohteella havaitut roudan syvyudet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.14. Varkauden roudan monitorointiasemalla havaitaan selkeät routanousut molempina havainnointitalvina, kun routa tunkeutuu 1,1 metrin syvyydeltä alkavaan pohjamaakerrokseen. Routimisen alettua roudan syvyys pysyy samalla syvyydellä ja aiheuttaa tasaisesti kasvavaa routanousua. Talvena 2010–2011 routa tunkeutuu helmikuun alussa vielä syvemmälle vajaaseen 1,5 metriin, jolloin se aiheuttaa todennäköisesti uuden jäälinnsin syntymisen ja routanousun lähtemisen nopeaan nousuun. Varkauden kohteen routa sulaa radan rakennekerroksista 3-4 viikon aikana. Ratapölkkyjen molempien päiden routanousut ovat aikaisempaa talvena samansuuruiset, mutta jälkimmäisenä talvena ratapölkyn päiden välillä havaitaan noin viiden millimetrin ero. Ero johtuu todennäköisesti siitä, että routa on tunkeutunut erittäin routivaan kerrokseen vain ratapölkyn toisessa päässä talvena 2011–2012. Erittäin routiva kerros sijaitsee noin 1,2 metrin syvyydellä, mutta sen syvyys voi hieman vaihdella ratarakenteen poikkileikkauksessa.

Varkauden koekohteessa routiminen aiheutuu pohjamaasta ja routimista tapahtuu ohuesta rakennekerrospaksuudesta johtuen joka vuosi. Routiminen on aiheuttanut kohteella merkittävät routanousut.



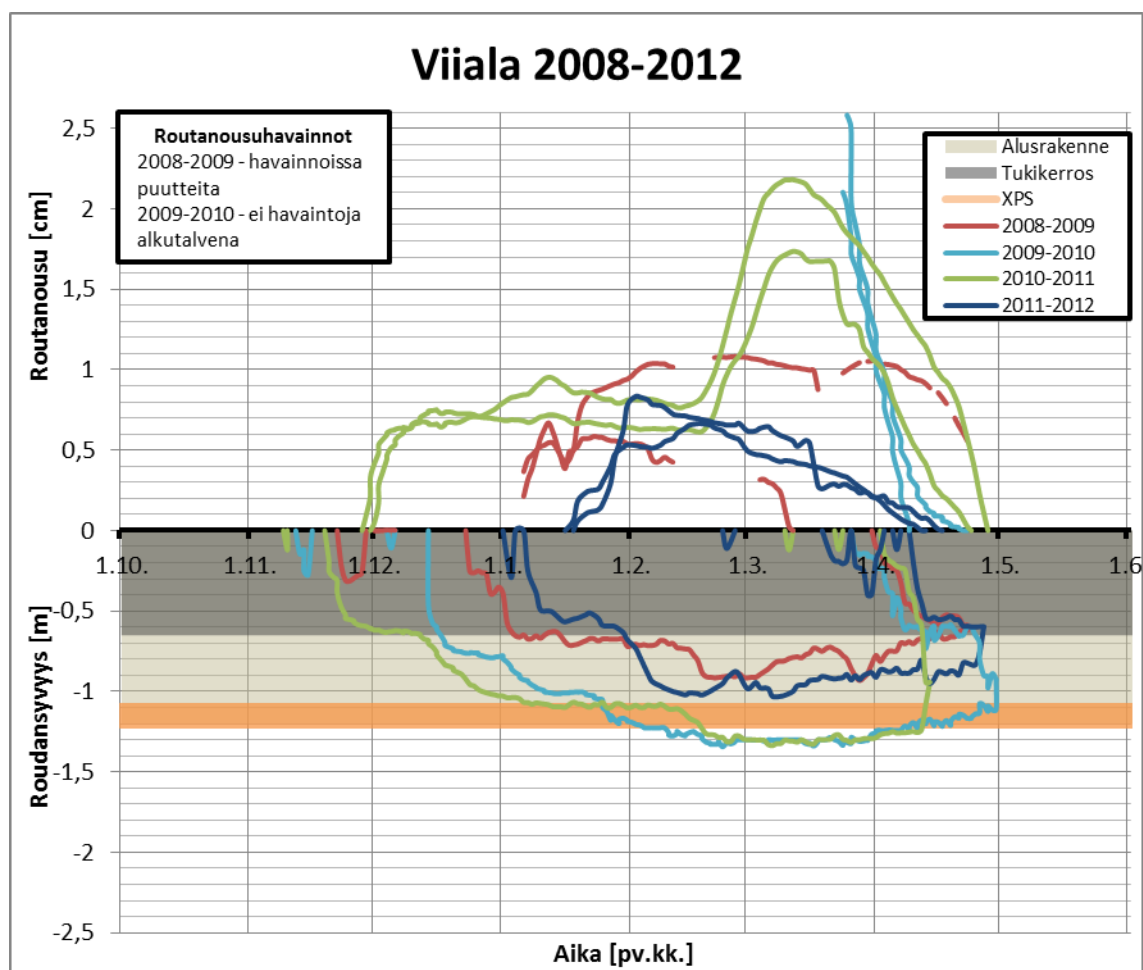
Kuva 5.14. Varkauden koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

Viiala

Viialan koekohteella havaitut roudan syvyydet ja routanousut on esitetty kuvassa 5.15. Viialan roudan monitorointiasemalla havaitaan jokaisena havainnointitalvena merkittäviä routanousuja, jotka johtuvat 0,65 metrin syvyydellä olevasta tuki- ja alusrakennekerroksen rajapinnasta. Tällä syvyydellä on selkeästi routivaa materiaalia ja vettä saatavilla, koska routanousut ovat suuruudeltaan huomattavia. Kohteessa on myös routiva pohjamaakerros noin 1,2 metrin syvyydellä, jolloin routa aiheuttaa routanousujen nopean kasvamisen.

Viialan roudan monitorointiasemalla on siirtymäantureiden mittaushäiriö alkutalvena 2009–2010, jonka takia talven routanousu havaitaan vasta maaliskuun lopulla. Sen talven routanousu on ollut suuruudeltaan merkittävin. Talven 2008–2009 routanousuhavainnoissa oli puutteita, jotka näkyvät kuvaajassa puuttuvina aikaväleinä.

Viialan koekohteessa on selkeästi liian ohuet routimattomat rakennekerrokset, koska routa on edennyt useasti ratarakennekerroksia syvemmälle pohjamaahan. Kohteen kuivatuksessa on todennäköisesti myös puutteita ja koekohteella on routivaa rakennekerrosmateriaalia, koska ratarakenne routii jo molemmissa rakennekerroksissa. Ongelmia aiheuttaa myös ratarakenteessa olevan routalevyn asennustapa, sillä levy on asennettu virheellisesti suoraan pohjamaan päälle.



Kuva 5.15. Viialan koekohteen roudan syvyys-/routanousukuvaaja.

5.1.3 Koekohteiden lämpötilaprofiilit

Roudan monitorointikohteilta kerättävän ratarakenteen lämpötiladatan avulla voidaan tarkastella roudan syvyyden lisäksi rakennekerrosten lämpötiloja ja aineistosta voidaan luoda lämpötilaprofiileja monitorointikohteilta. Lämpötilaprofiileilla voidaan havainnollistaa rakennekerrosten lämpötiloja ajanhetkittäin, jolloin talvien lämpötilavertailu helpottuu. Tutkimuksen liitteeseen 4 on koottu roudan monitorointikohteiden lämpötilaprofiilit talvittain.

Liitteessä 4 monitorointikohteiden ratarakenteen lämpötilat esitetään kuukausittain lokakuusta kesäkuuhun eri syvyyksillä, jolloin kuvaajista voi tulkita lämpötilagradienttia, joka on käyrän kulmakerroin havainnoitavalla syvyydellä. Lämpötilaprofiileissa kuukausien lämpötiloina käytettiin jokaisen kuukauden ensimmäisen päivän lämpötilojen keskiarvoja. Lämpötilaprofiilista voidaan tulkita routarajan etenemisnopeutta, milloin routa saavuttaa maksimi syvyyden, milloin routa alkaa sulaa ja mistä kerroksesta. Roudan sulettua havaitaan kaikkien rakennekerroksien lämpötilojen voimakas kohoaaminen. Syvemmälle maaperässä mentäessä voidaan havaita eri ajankohtien lämpötilojen lähestyvän, kuten maaperän lämpöteorian mukaan pitäisikin tapahtua.

5.1.4 Koekohteiden vesipitoisuudet

Ratarakenteen vesipitoisuutta on havainnoitu kahdeksalta roudan monitorointiasemalta: Kitee, Kuopio, Paltamo, Tornio 921, Tornio 925, Tornio 932, Tornio 945 ja Varkaus. Tornio 921 ja Tornio 925 roudan mittausasemilla mittauksia on tehty neljällä kosteusanturilla, jotka on sijoitettu ratarakenteen alusrakennekerrokseen. Muut ratarakenteen kosteutta mittaavat roudan monitorointiasemat on varustettu kymmenellä kosteusanturilla, jotka mittaavat koko ratarakenteen syvyydeltä ulottuen pohjamaan yläosaan saakka. Kosteusantureiden sijaintisyvyydet riippuvat koekohteesta. Tornion monitorointiasemat ovat mitanneet ratarakenteen kosteutta vuoden 2009 lopusta eteenpäin ja loput ratarakenteen kosteutta mittavat monitorointiasemat ovat keränneet kosteushavaintoja vuoden 2010 lopusta alkaen. Paltamon monitorointiaseman kosteusanturit ovat liikkuneet pois asennuskohdastaan syksyn 2011 lopussa radan kunnostustöiden seurauksena eivätkä mittaustulokset olleet sen jälkeen luotettavia.

Kosteusantureilta on kerätty havaintoja jatkuvasti tunnin välein. Tuloksissa esitettäviä kuvaajia varten havaintomateriaalista otettiin noin viikon mittaisten aikavälien keskiarvot antureittain havaintomateriaalin vähentämiseksi ja sen käsittelyn helpottamiseksi. Kuvaajissa mittausasemien kosteushavainnot on esitetty antureittain, jolloin jokainen kuvaajan viiva kuvaa anturin kosteusprosentin vaihtelua havaitulla aikavälillä. 0 % kuvaa täysin kuivaa materiaalia ja 100 % täysin vedellä kyllästynyttä materiaalia. Kosteusanturin jäätyessä sen näyttämä arvo ei ole luotettava, sillä anturilla voidaan mitata vain sulaa vettä, ei jäätä.

Kosteusantureiden mittaamat kosteusarvot eivät mittaa suoraan ratarakenteessa olevien materiaalien kosteutta vaan ne mittaavat antureiden ympärillä olevan asennushiekkan kosteutta, jolloin on mahdollista syntyä pieni virhe, koska eri materiaalit voivat

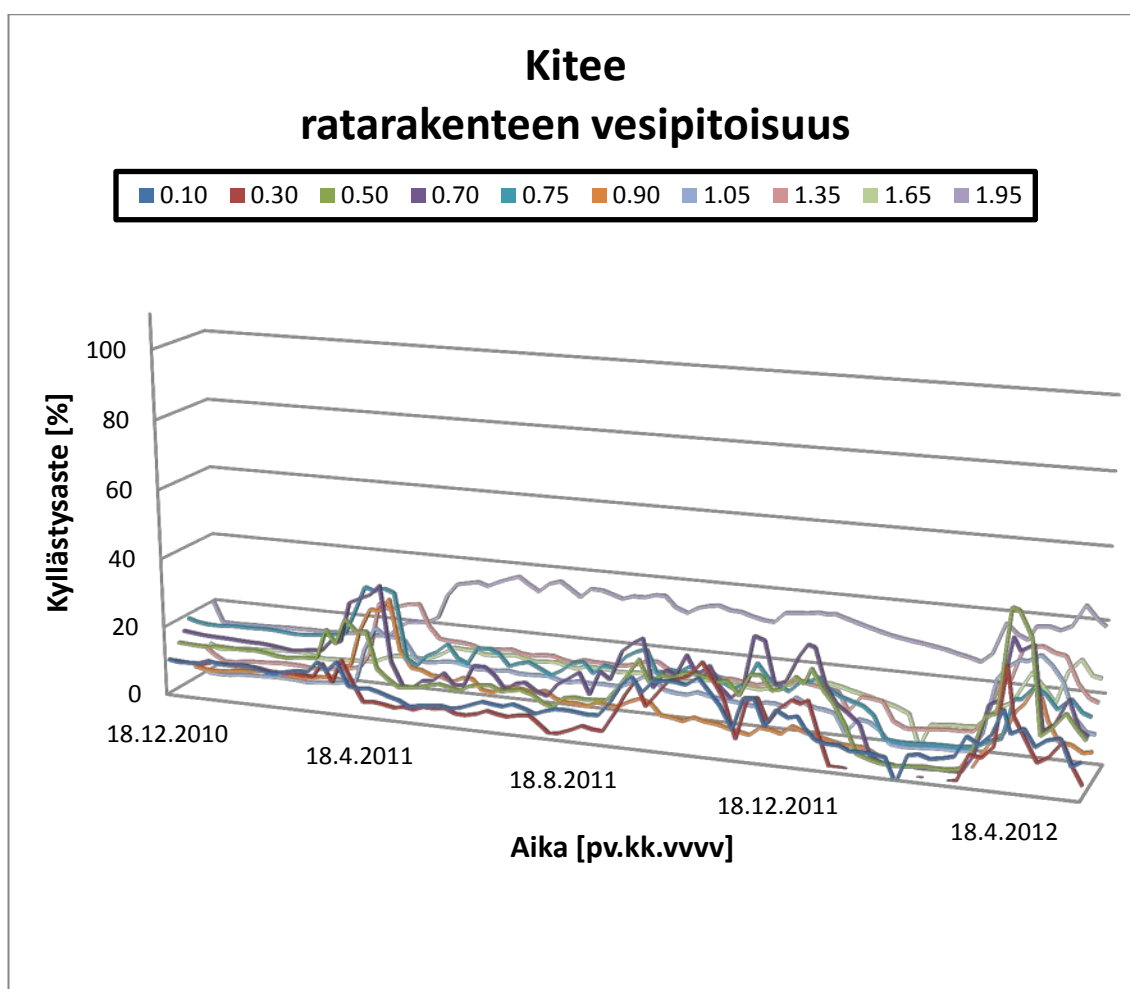
sitoa itseensä eri määrän vettä kuin asennushiekka. Havaitut kosteusarvot antavat rata-rakenteen likimääräisen kosteuden ja havainnon antureiden ympäristön kosteustilojen vaihtelusta.

Kosteusanturihavainnoista voidaan päätellä veden saatavilla oloa koekohteella ja siten veden vaikutusta koekohteen routimiseen. Havainnoista voidaan mahdollisesti tulkita pohjavedenpinnan aseman vaihtelua vuodenajan mukaan, jos anturit on asennettu ulottumaan pohjavedenpinnan syvyydelle, toisin sanoen jos pohjavesi on lähellä radan pintaa. Pohjavesi havaitaan täysin vedellä kyllästyneen maan anturihavaintoina eli anturin arvon saadessa lähes 100 prosentin havaintoarvon. Pohjaveden mahdollista kapillaarista nousua asennushiekassa ei ole huomioitu tutkimuksessa. Monitorointikohteiden ratarakenteen kosteudesta ollaan kiinnostuneita erityisesti syksyisin ennen sen routaantumisen alkamista, kun tutkitaan syyssateiden merkitystä ratarakenteen routimiseen. Jos ratarakenne on erittäin kostea syksyllä syyssateiden jälkeen, saattaa radan routimista edistävää vettä olla helposti jäälinssien saatavilla. Kosteusanturihavainnoista nähdään keväisin roudan sulamisvaiheessa tapahtuva radan rakenteen kosteuspitoisuuden kasvu, jolloin voi tapahtua radan sulamispehmenemistä ja radan kantavuuden alenemista. Rata-rakenteen kosteuspitoisuus kasvaa keväällä roudan sulaessa, koska ensin sulavien radan pintakerrosten sulavedet eivät pääse kulkeutumaan yhä jäässä olevien syvempien kerrosten läpi maaperään.

Kosteushavainnot on esitetty seuraavilla sivuilla kohdekohtaisesti kuvaajina, joista ilmenee kyllästysaste ajan suhteen ratarakenteen eri syvyyksillä.

Kitee

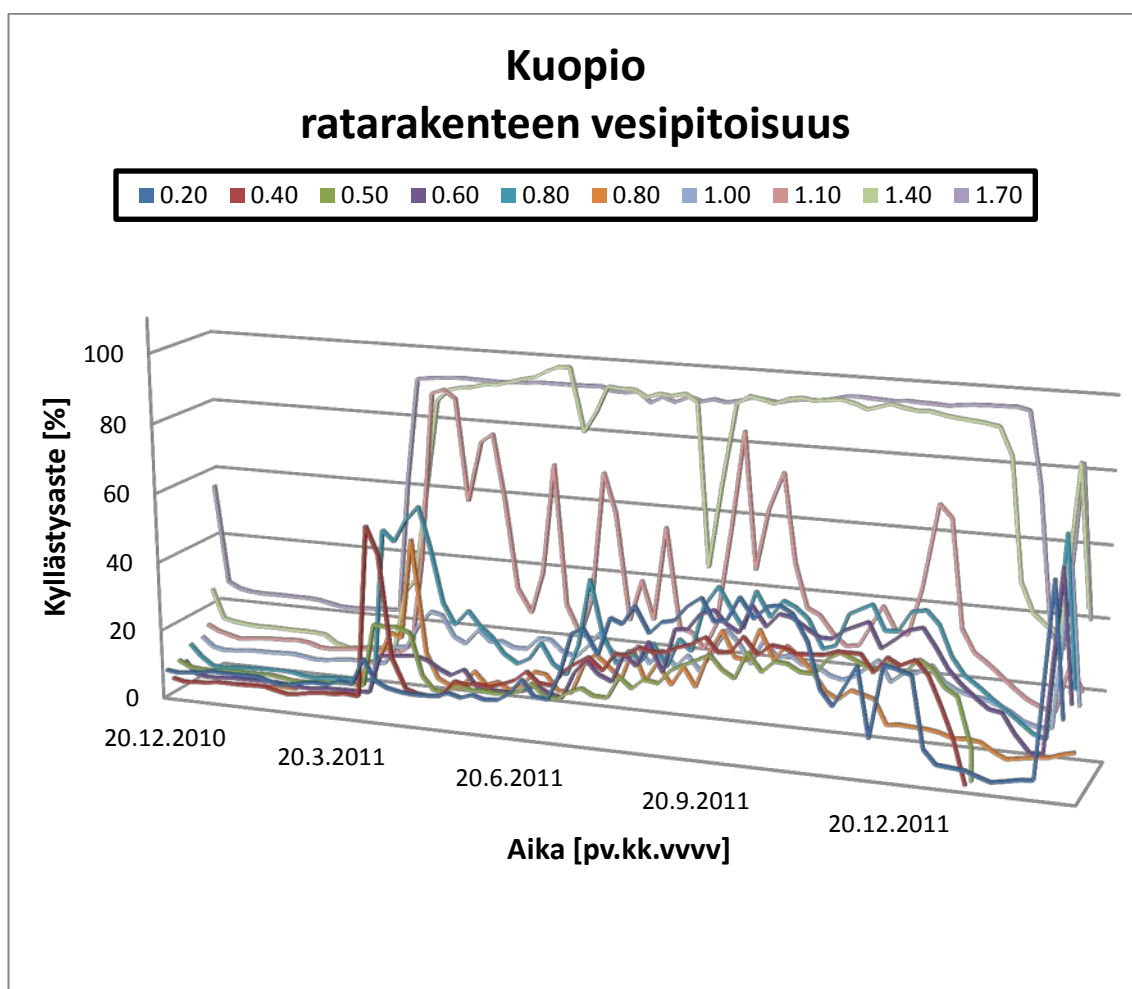
Kiteen roudan monitorointiaseman vesipitoisuudet on esitetty kuvassa 5.16. Kiteen kohteelta havaitut vesipitoisuudet kertovat rakenteen olevan kunnossa kuivatusominaisuuksiltaan. Ratarakenteen kosteusarvot eivät nouse korkeiksi millään ajanjaksolla. Kuvasta havaitaan molempien havaintotalvien jälkeisten keväiden kohdilla kosteusarvojen nousut tasaisesti jokaisella syvyydellä, mikä selittyy lumen sulamisen ja kevätsateiden seurauksena rakenteeseen vapautuneen sulan veden määrän kasvulla. Vuoden 2011 kevään jälkeen ratarakenne on kuivunut nopeasti, ainoastaan syvin kerros erottuu muista suurempien kosteusarvojen perusteella. Syksyllä ratarakenne on sitonut itseensä hieman vettä ennen ratarakenteen jäätymistä. 1,95 metrin syvyydellä oleva anturi on mitannut muita syvyyksiä korkeampia kosteuspitoisuuksia, mikä voi johtua tällä syvyydellä olevasta hienorakeisemmasta materiaalista, joka pystyy sitomaan enemmän vettä itseensä. Talvikuukausien alhaiset kosteuspitoisuudet johtuvat veden jäätymisestä, minkä takia kosteusanturit eivät näytä oikeaa kosteuspitoisuutta.



Kuva 5.16. Kiteen roudan monitorointiasemalla havaitut ratarakenteen kyllästysasteet syvyyksittäin.

Kuopio

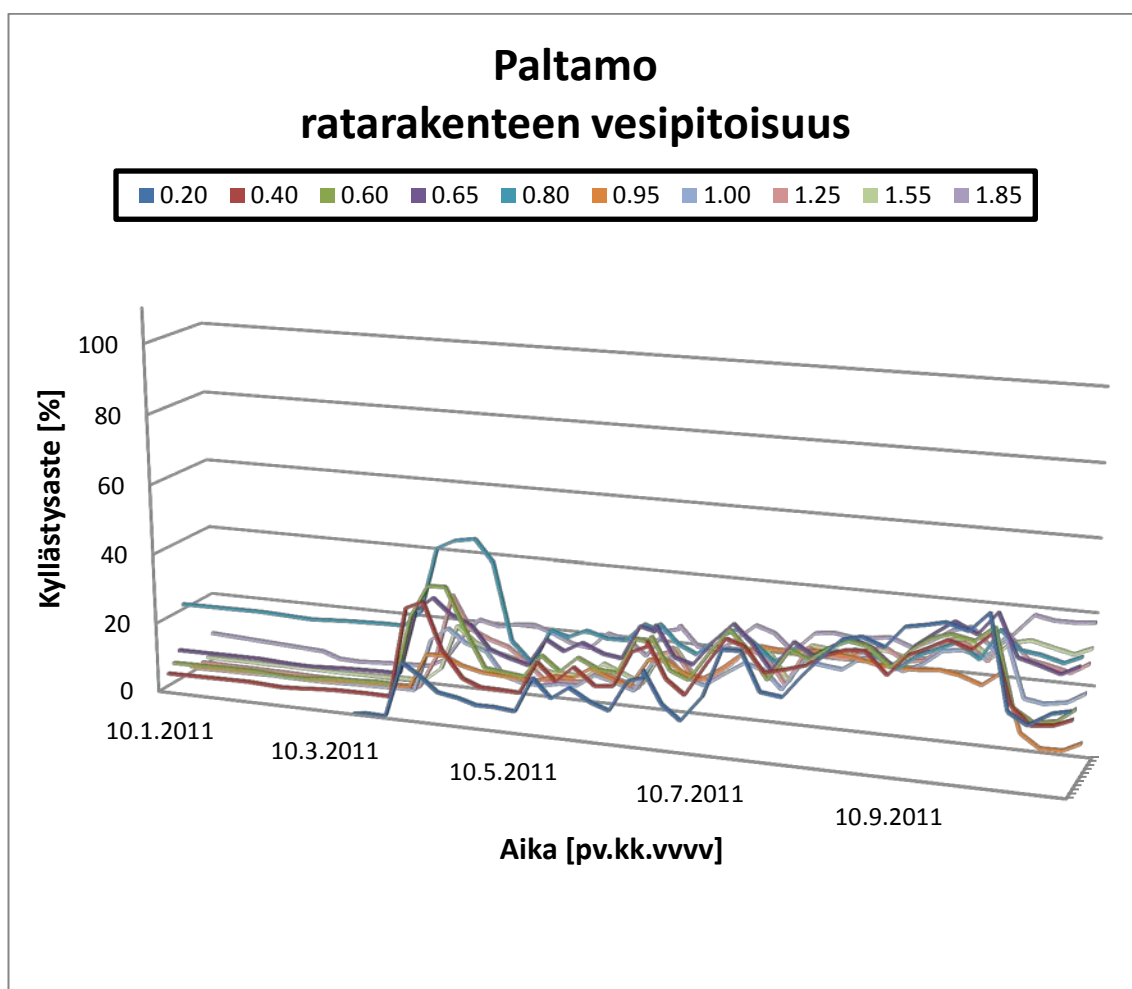
Kuopion roudan monitorointiaseman vesipitoisuudet on esitetty kuvassa 5.17. Kuopion kohteelta voidaan havaita pohjaveden pinta antureiden mittausalueella. Kaksi syvintä kosteusanturia ovat selvästi vedellä kyllästyneitä tai kapillaarisen veden nousun vaikutuksesta kosteusanturit ovat kyllästyneen maan ympäröimiä, joten pohjaveden pinta on noin 1,4 metrin syvyydellä. Kuopiossa havaitaan ensimmäisen talven jälkeen lumen sulamisesta ja kevätsateista aiheutuva ratarakenteen kosteuden nousu, jonka jälkeen rakenne kuivuu nopeasti ja pysyy kuivana kunnes sitoo syksyllä vettä itseensä.



Kuva 5.17. Kuopion roudan monitorointiasemalla havaitut ratarakenteen kyllästysasteet syvyyksittäin.

Paltamo

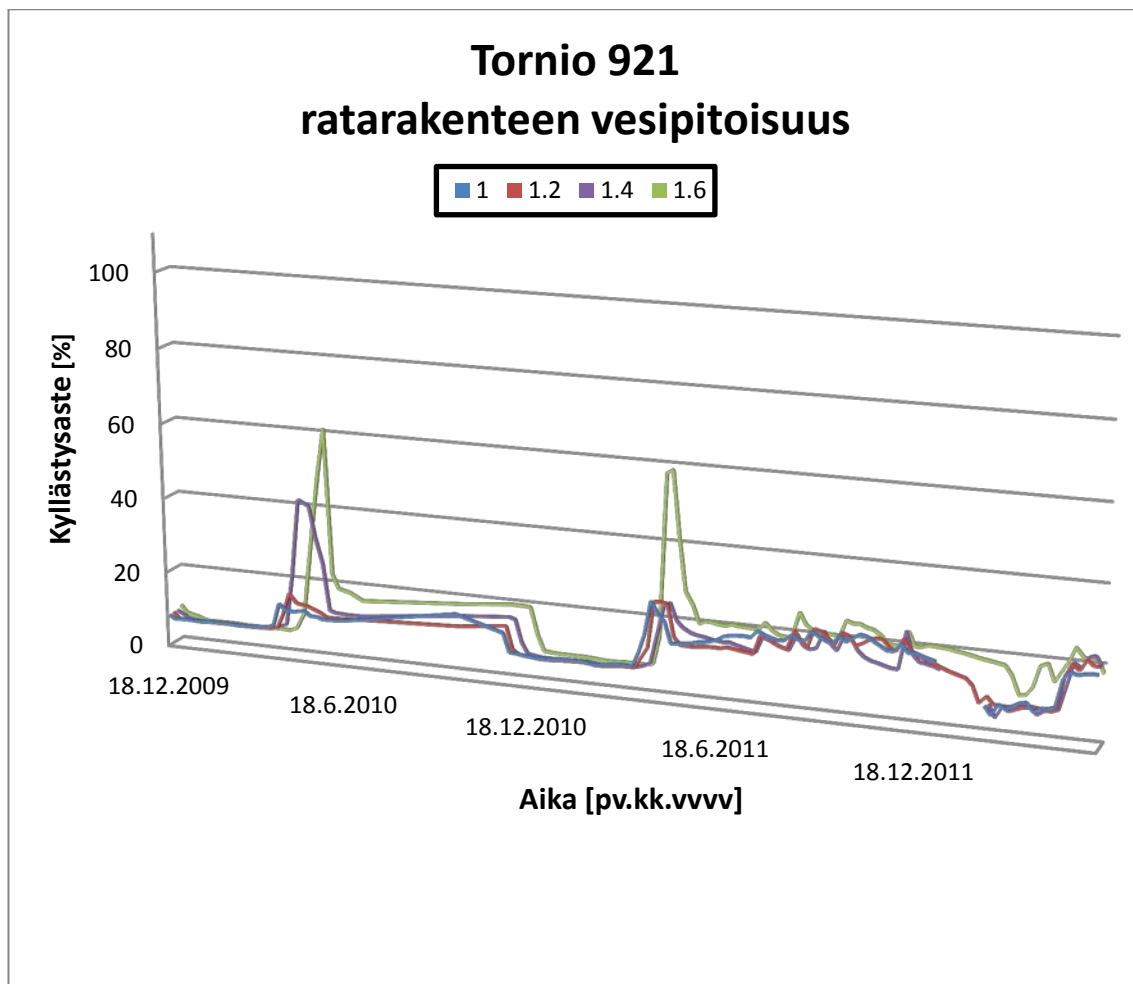
Paltamon roudan monitorointiaseman vesipitoisuudet on esitetty kuvassa 5.18. Paltamon kohteelta on vain yksi havaintotalvi. Havaintojen perusteella Paltamon ratarakenteen kyllästysasteet ovat matalia, mutta talven 2010–2011 kyllästysasteet voivat olla hieman virheelliset, koska kosteusanurit on asennettu ratarakenteen ollessa osin jäässä, jolloin anturiputken sisällä oleva hiekka ei ole ehtinyt tasoittua ympäröivään kosteuteen. Keväällä 2011 havaitaan lyhyt piikki kosteusarvoissa ja ennen seuraavaa talvea ratarakenne on sitonut hieman vettä itseensä.



Kuva 5.18. Paltamon roudan monitorointiasemalla havaitut ratarakenteen kyllästysasteet syvyyksittäin.

Tornio 921

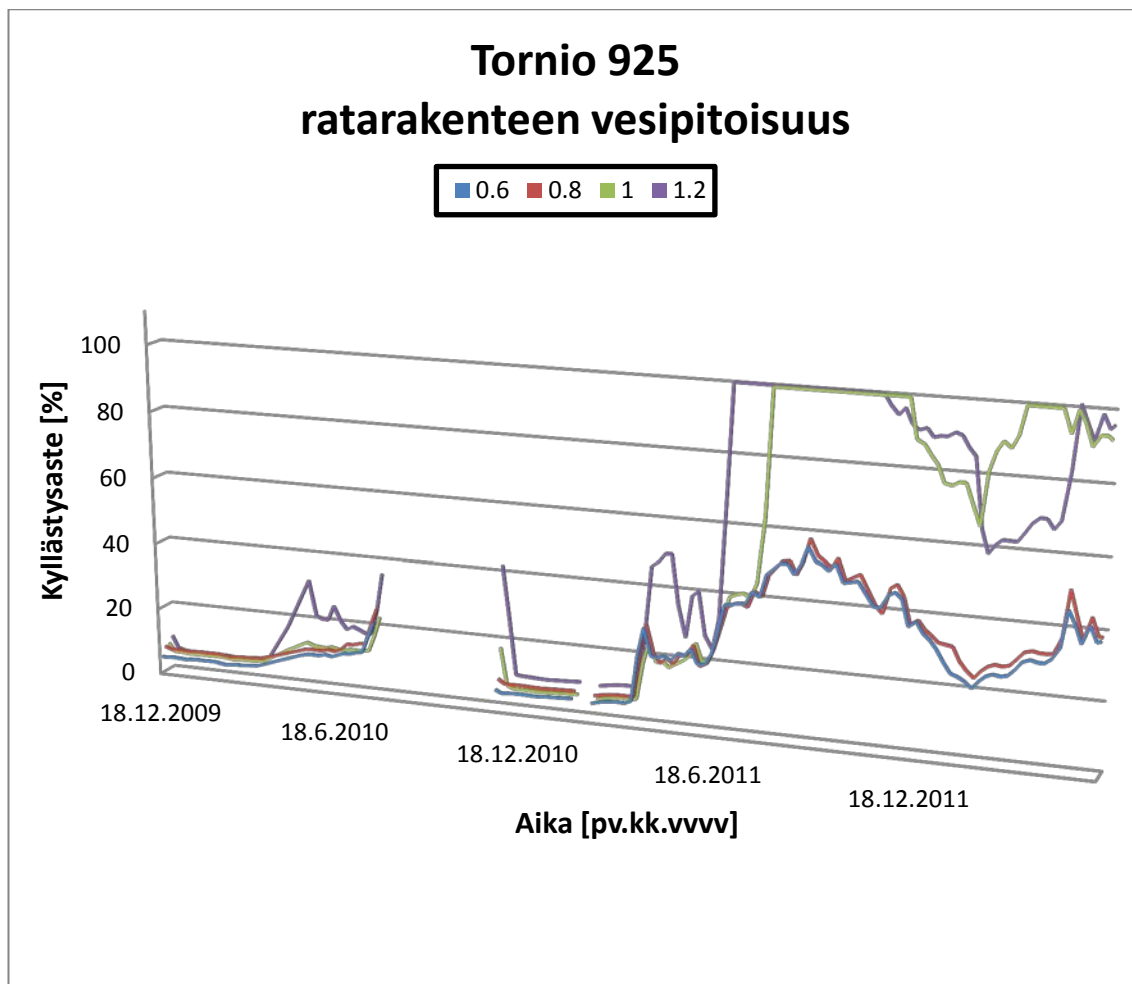
Tornion 921 roudan monitorointiaseman vesipitoisuudet on esitetty kuvassa 5.19. Tornion 921 kohteella havaitaan ainoastaan ratarakenteen kosteuden merkittävää kasvua keväisin roudan sulaessa, jolloin kosteuspitoisuuksien kasvu johtuu lumien sulamisesta ja kevätsateista.



Kuva 5.19. *Tornio 921 roudan monitorointiasemalla havaitut ratarakenteen kyllästysasteet syvyyksittäin.*

Tornio 925

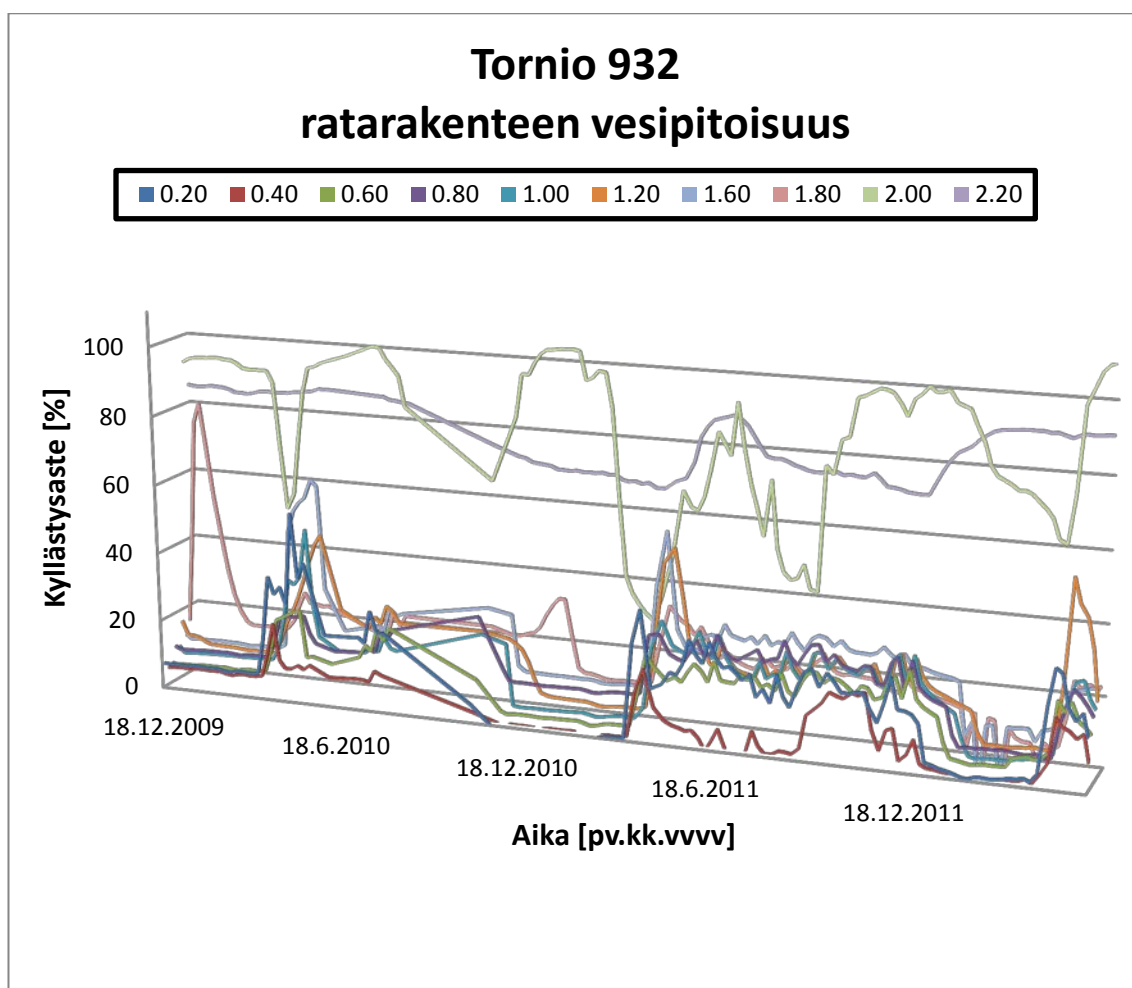
Tornion 925 roudan monitorointiaseman vesipitoisuudet on esitetty kuvassa 5.20. Tornion 925 kohteella havaitaan pohjavesi todella korkealla välillä jopa alle yhdessä metrissä syksystä 2011 eteenpäin. Myös ratarakenteen ylempien osien kosteus on kasvanut merkittävästi syksyllä 2011.



Kuva 5.20. Tornio 925 roudan monitorointiasemalla havaitut ratarakenteen kyllästysasteet syvyyksittäin.

Tornio 932

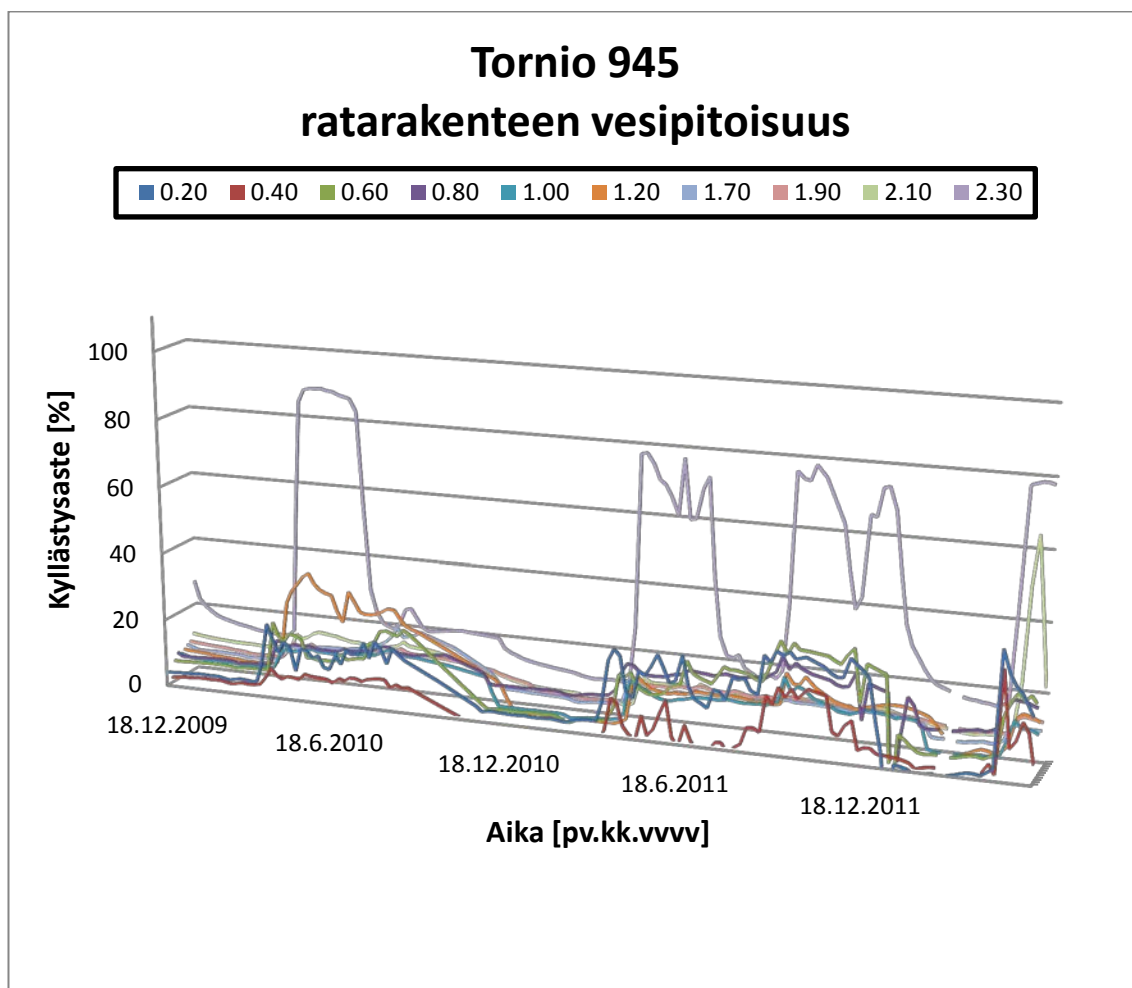
Tornion 932 roudan monitorointiaseman vesipitoisuudet on esitetty kuvassa 5.21. Tornion 932 kohteella voidaan havaita pohjaveden pinta lähellä syvintä kosteusanturia. Toiseksi alimman kosteusanturin mitaamat kosteusravot vaihtelevat paljon ja mitaavat välillä syvemmällä olevaa anturia korkeampia kosteuspitoisuuksia. Suuret kosteuserot näiden antureiden välillä johtuvat todennäköisesti mittausvirheestä. Kahden metrin syvyydellä olevaa kosteuspitoisuusanturin käyrää pitäisi laskea hieman ja 2,2 metrin syvyydellä olevan kosteuspitoisuusanturin käyrää pitäisi vastaavasti nostaa, jotta mittaus-tulokset vastaisivat paremmin todellisuutta. Kuvaajasta havaitaan myös ratarakenteen kosteuden kasvaminen keväisin roudan sulaessa sekä syksyisin veden sitoutuessa radan rakennekerroksiin.



Kuva 5.21. *Tornio 932 roudan monitorointiasemalla havaitut ratarakenteen kyllästysasteet syvyyksittäin.*

Tornio 945

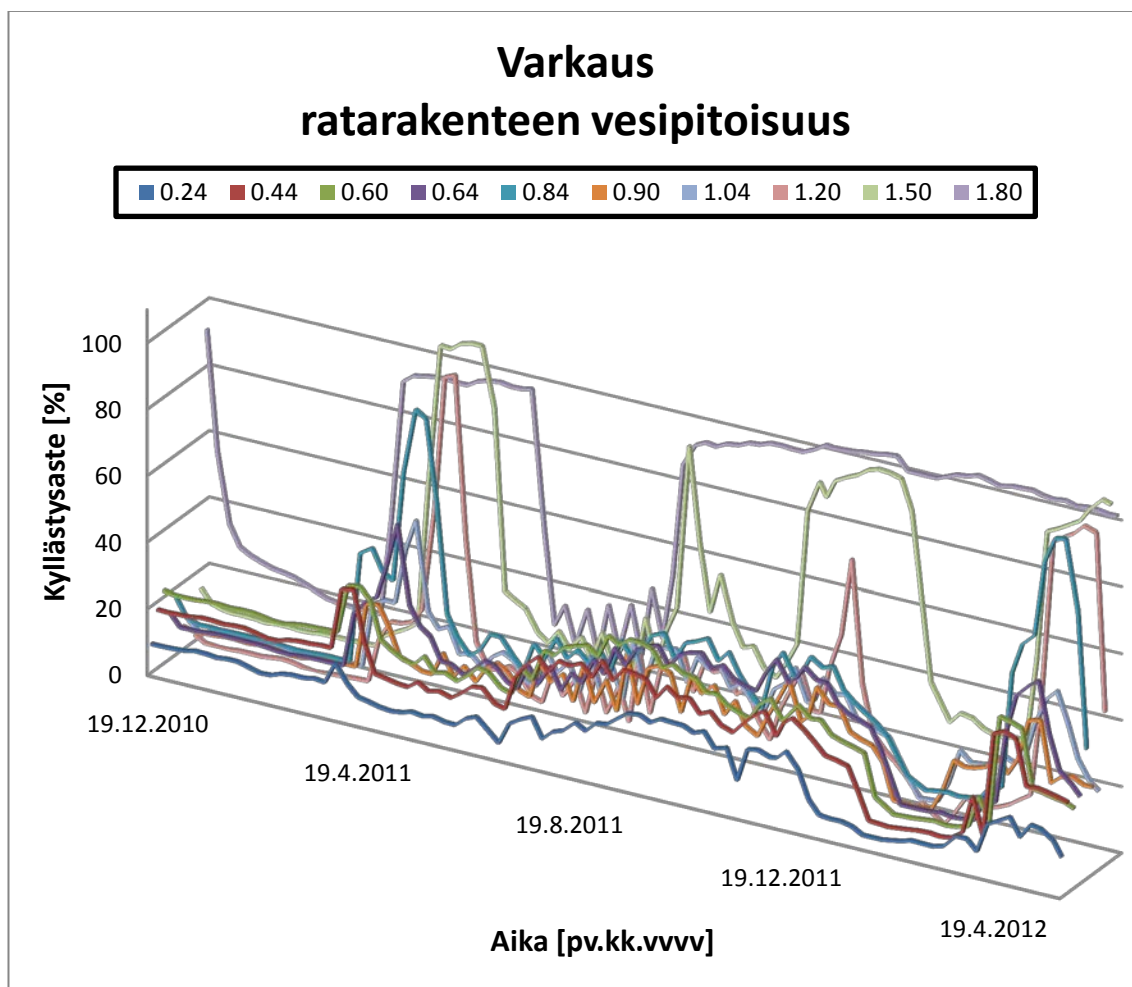
Tornion 945 roudan monitorointiaseman vesipitoisuudet on esitetty kuvassa 5.22. Tornion 945 kohteella havaitaan syvimmän kosteusanturin korkeat kosteusanturin arvot keväisin roudan sulettua, josta voidaan päätellä pohjaveden sijaitsevan lähellä syvintä anturia. Ratarakenteen kosteus kasvaa keväisin roudan ja lumen sulettua sekä syksyisin ennen ratarakenteen jäätymistä.



Kuva 5.22. *Tornio 945 roudan monitorointiasemalla havaitut ratarakenteen kyllästysasteet syvyyksittäin.*

Varkaus

Varkauden roudan monitorointiaseman vesipitoisuudet on esitetty kuvassa 5.23. Varkaudessa havaitaan pohjaveden pinta lähellä syvintä anturia. Pohjavedenpinta vaihtelee vuodenaikojen mukaan, syksyisin pohjaveden pinta nousee toiseksi syvimmän anturin tasolle noin 1,5 metrin syvyydelle ja kesällä se laskee antureiden mittausalueen ulkopuolelle. Varkaudessa havaitaan myös merkittävää ratarakenteen kosteuden nousua talven jälkeen ja sen kuivuminen on hitaampaa kuin muilla monitorointikohteilla. Ratarakenteen ja erityisesti syvempien rakennekerrosten sekä pohjamaan kosteus kasvaa syksyllä ennen talven alkua.



Kuva 5.23. Varkauden roudan monitorointiasemalla havaitut ratarakenteen kyllästysasteet syvyyksittäin.

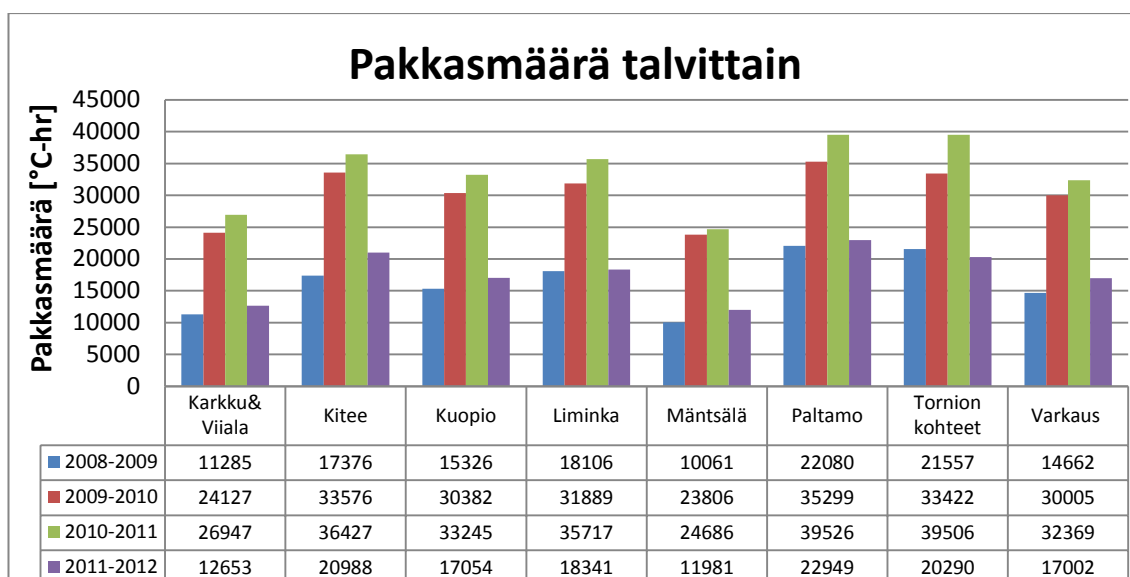
5.1.5 Koekohteiden ilmastotiedot

Pakkasmäärä

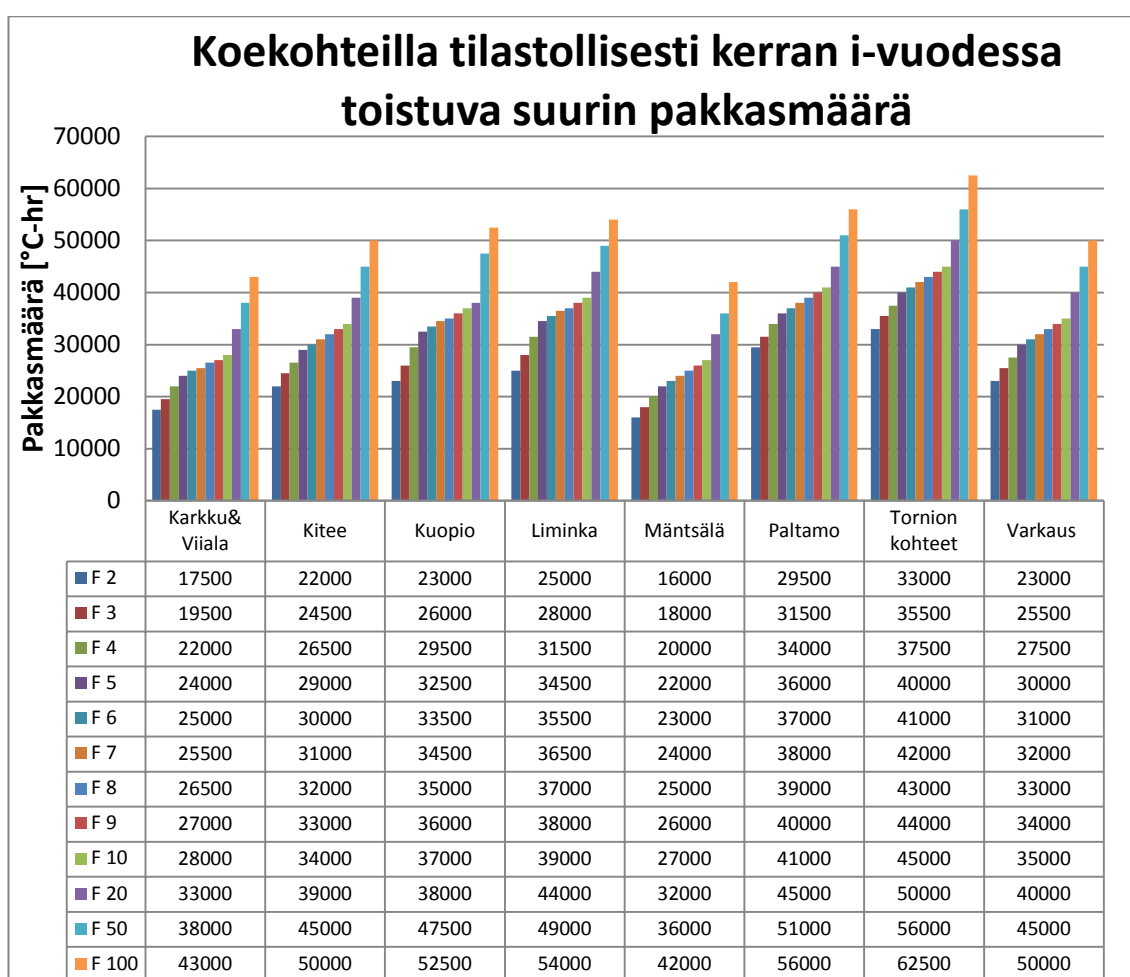
Havainnointitalvien ankaruuksia koekohteittain on järkevää arvioida koekohteiden pakkasmäärien avulla. Suuren pakkasmäärän vaikutusta ratarakenteen routivuuteen voi pienentää kohteen sijainti, maaston muodot, rakenteen kosteus ja lumikerroksen paksuus. Leikkauksessa sijaitseva koekohde voi kerätä paljon lunta radan vieressä oleviin ojiin ja ratapenkereet voivat kinostaa lunta radan toiselle reunalle, jos kohde on altis kinostumiselle. Tällöin lumen eristysvaikutus vähentää merkittävästi ankaranakin talvena roudan tunkeutumista. Toisaalta pakkasmäärän perusteella leutona vähälumisena talvena routaraja voi edetä yhtä syvälle radan rakenteeseen kuin ankarana ja runsaslumisena talvena. Lumipeitteen syntyajankohta vaikuttaa myös samoin kuin talven aikana mahdollisesti esiintyvät suojakaudet, jolloin ilman lämpötila kohoaa nollan yläpuolelle.

Talvien pakkasmäärät ovat esitetty kuvassa 5.24. Kuvaajan tiedot perustuvat koekohteita lähimpien Ilmatieteen laitoksen sääasemien ilmastotietoihin. Pakkasmäärät on laskettu Ilmatieteen laitoksen ilmoittamien vuorokautisten keskilämpötilojen perusteella. Kuvaajasta huomataan leudon ja ankarien talvien merkittävä ero pakkasmäärissä. Etelä-Suomen koekohteilla leudon talven 2008–2009 pakkasmäärä on alle puolet ankaran talven 2010–2011 pakkasmäärästä. Pohjois-Suomen koekohteilla talvien pakkasmäärien ero ei ole niin suuri, mutta kuitenkin merkittävä. Koekohteen sijainnilla on merkitystä pakkasmäärän suuruuteen. Mäntsälässä on mitattu leutona talvena 10 000 Kh pakkasmäärä, kun Torniossa ja Paltamossa on mitattu ankarana talvena lähes 40 000 Kh pakkasmäärä.

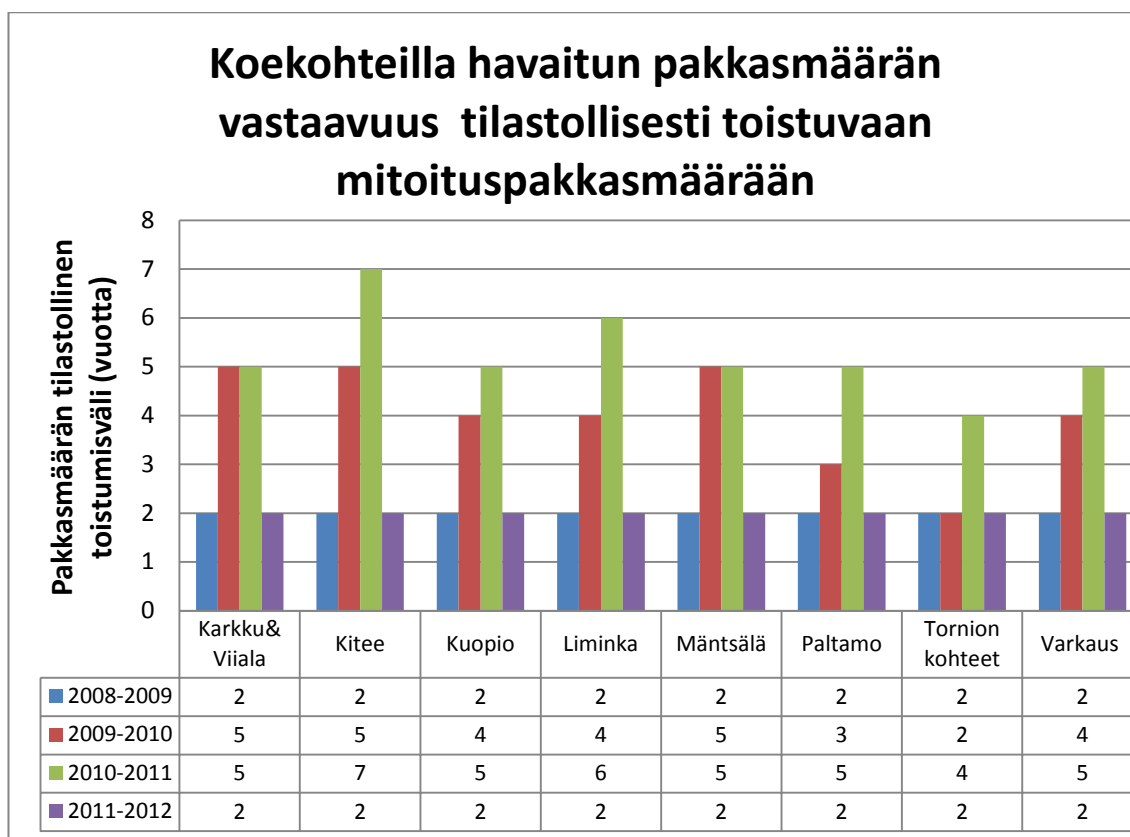
Ilmatieteen laitoksen säähavaintojen perusteella laskettuja pakkasmääriä voidaan verrata tilastollisesti kerran tietyillä aikaväleillä toistuviin pakkasmääriin. Kuvassa 5.25 esitetään koekohteilla tilastollisesti kerran i-vuodessa toistuvat suurimmat pakkasmäärät F_i ja kuvassa 5.26 näitä vertaillaan koekohteilla havaittuihin pakkasmääriin. Kuvan 5.25 tilastollisesti toistuvien pakkasmäärien arvot vuosien F_2 – F_5 ja F_5 – F_{10} välillä on interpoloitu lineaarisesti. Kuvasta 5.26 havaitaan, että talvien 2008–2009 ja 2011–2012 pakkasmäärät jokaisella mittauskohteella toistuvat tilastollisesti joka toinen vuosi, joten kyseiset talvet ovat olleet leutoja. Kiteen ja Limingan mittauskohteille laskettu pakkasmäärät talvelle 2010–2011 vastaa tilastollisesti kerran kymmenessä vuodessa toistuvaa suurinta pakkasmäärää. Useimpien kohteiden talvien 2009–2010 ja 2010–2011 pakkasmäärät vastasivat tilastollisesti kerran 3–5 vuodessa toistuvia suurimpia pakkasmääriä. Pakkasmäärien tilastollista toistuvuutta arvioitaessa kenttämittausten ajanjaksolle ei osunut yhtään tilastollisesti hyvin harvoin toistuvaa pakkasmäärää.



Kuva 5.24. Kenttämittaushaasteita lähimpänä olevilla Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemilla havaittujen vuorokautisten keskilämpötilojen perusteella lasketut pakkasmäärät.



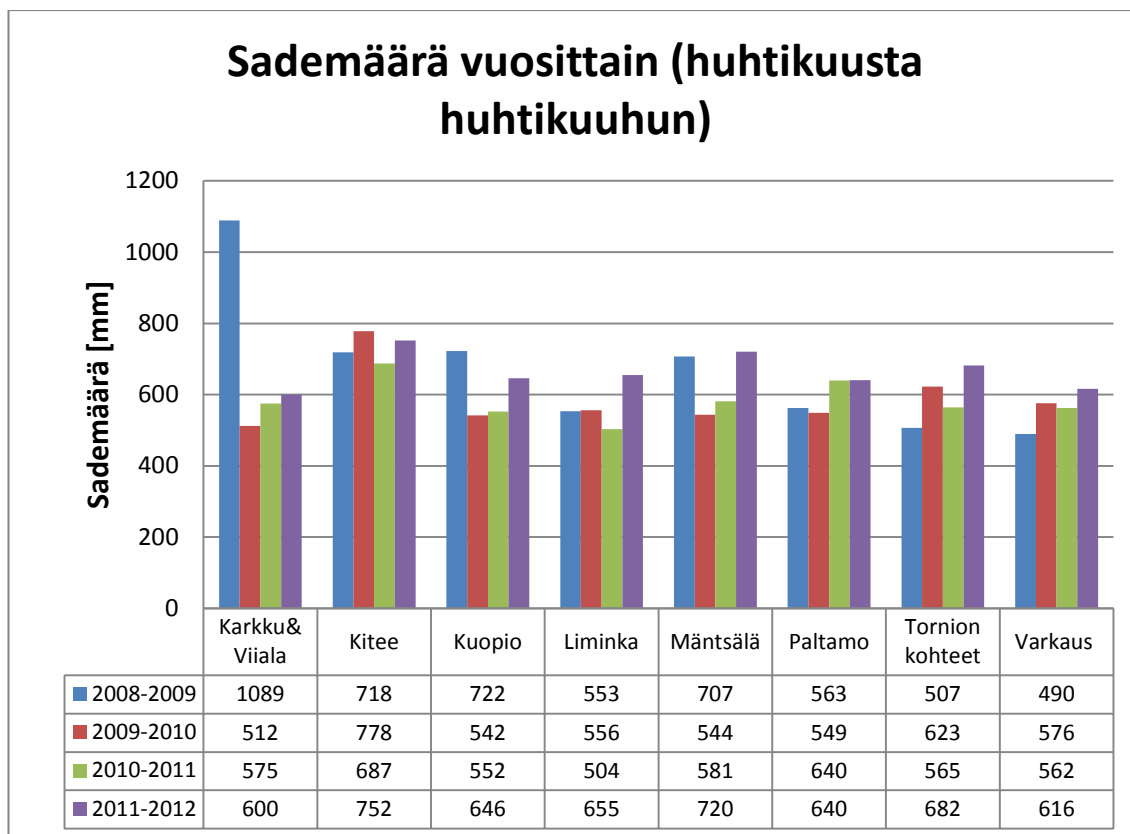
Kuva 5.25. Kenttämittaushaasteilla tilastollisesti kerran i-vuodessa toistuvat suurimmat pakkasmäärät. Välien F_2 - F_5 ja F_5 - F_{10} arvot on interpoloitu lineaarisesti (Ratahallintokeskus 2008, RIL 2012).



Kuva 5.26. Tilastollinen toistumisväli (vuotta) kenttämittaustasanteissa eri talvina havaituille pakkasmäärille.

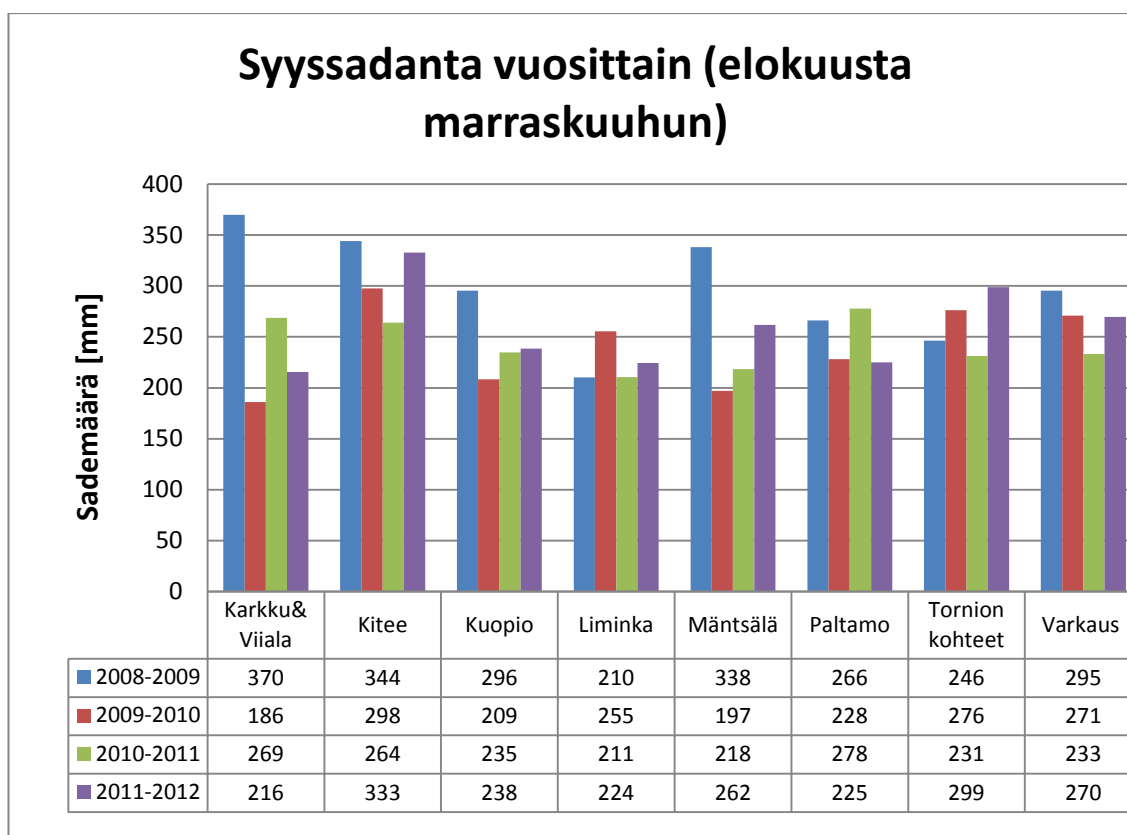
Sademäärä

Koekohteiden vuosittaisten sademäärätietojen avulla voidaan arvioida ratarakenteen kosteustilaa. Kuvassa 5.27 on esitetty vuosittaiset sademäärähavainnot koekohteita lähimmiltä säähavaintoasemilta. Kuvaajassa on esitetty sademäärähavainnot vuosittain ajanjaksolta huhtikuusta huhtikuuhun. Ajanjakso huhtikuusta huhtikuuhun on valittu havaintomateriaalista johtuen ja jotta talvien aikainen sadanta tulisi samalle aikavälille. Tarkempia sademäärähavaintoja varten vuosittainen sademäärät voidaan jakaa lyhyempiin ajanjaksoihin, jolloin voidaan selvittää sademäärät ennen talvea, sen aikana ja talven jälkeen. Routimisen kannalta oleellisin sademäärätieto on ennen talvea tapahtuva syyssadanta, joka voi vaikuttaa koekohteesta riippuen paljon ratarakenteen kosteustilaan, pohjaveden pinnan tasoon ja siten koekohteen routimiseen. Kuvassa 5.28 on esitetty vuosittaiset sademäärähavainnot syyssadannasta koekohteita lähimmiltä säähavaintoasemilta.



Kuva 5.27. Ilmatieteen laitoksen sademäärähavainnot kenttämittaushavainnotkohteita lähimpänä olevilta säähavaintoasemilta.

Kuvaajasta 5.27 havaitaan vuosittaisten sademäärien vaihtelujen olevan huomattavasti tasaisempia kuin pakkasmäärien vaihteluiden. Koekohteen sijainnilla Etelä- tai Pohjois- Suomeen ei ole merkitystä sademääriin, mutta paikallisia eroja löytyy. Karkkua ja Viialaa lähimmän säähavaintoaseman mittaama vuoden 2008–2009 sademäärä on poikkeuksellisen suuri. Sademäärä voi poiketa paikallisesti paljonkin havaintokohteiden lähistöllä. Kuvaajan tietoihin on laskettu yhteen vetenä ja lumena maahan tuleva sademäärä.

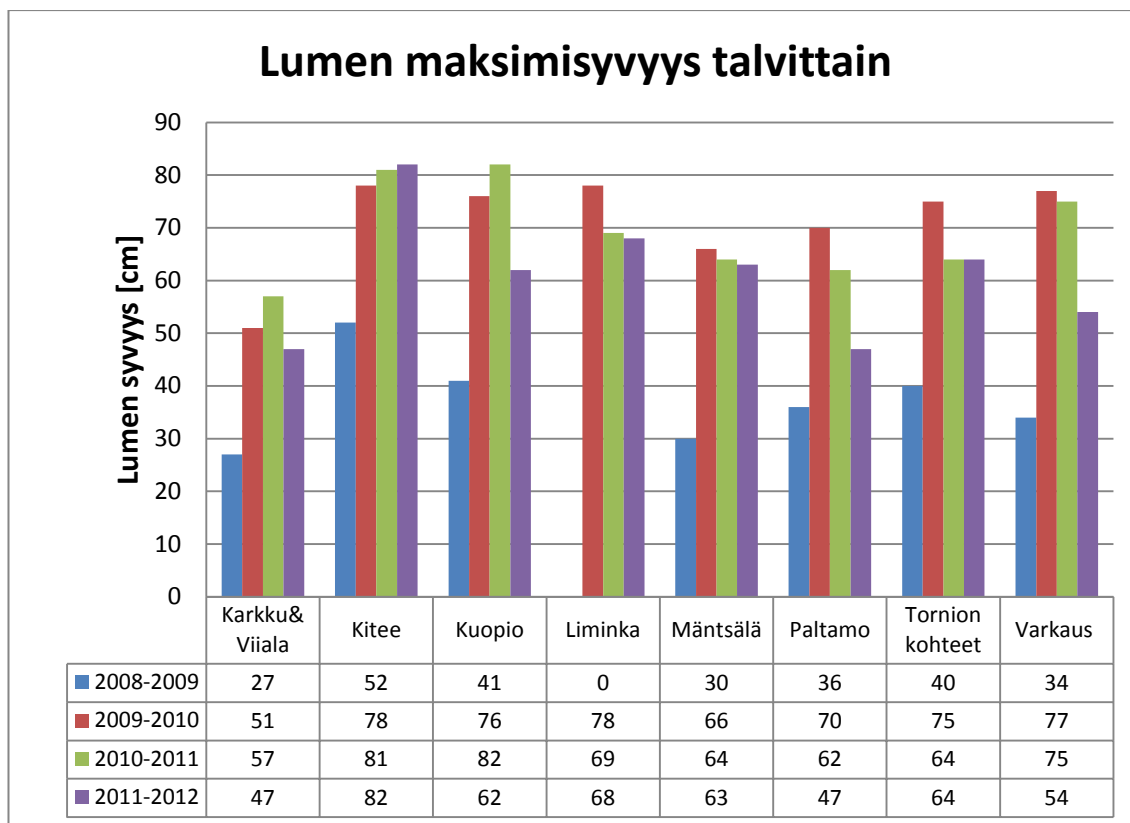


Kuva 5.28. Ilmatieteen laitoksen sademäärähavainnot syys-sadannasta kenttämittaust-kohteita lähimpänä olevilta säähavaintoasemilta.

Lumensyvyys

Koekohteita lähimmän säähavaintoaseman lumen syvyyshavaintojen perusteella luotu kuvaaja 5.29 lumen maksimisyvyydestä havainnollistaa talvien välisiä eroja. Lumen maksimisyvyys ei kerro kaikkea talven lumitilanteesta ja sen vaikutuksista koekohteen routivuuteen ja routimiseen, koska tarkempi lumen vaikutusten analysointi vaatisi tarkempia analysointeja lumipeitteen syntyajankohdasta ja sen paksuuden vaihteluista talven aikana. Tarkempi lumipeitteen vaikutuksen analysointi rajataan tämän tutkimuksen ulkopuolelle, vaikkakin se olisi mahdollista tehdä kerätyn tutkimusaineiston perusteella.

Lumen maksimisyvyys noudattaa havaintojen perusteella pakkasmäärien mukaista järjestystä eli leutona talvena lumen maksimisyvyys on pienempi kuin ankarana talvena. Tämän ilmiön selittää yleensä suuremman pakkasmäärän talvena vallitseva pidempi pakkaskausi, jolloin sade tulee lumena maahan ja kasvattaa syntyvän lumikerroksen paksuutta kauemmin. Ilmiötä selittää myös se, että leutona talvena isompi osa lumesta sulaa suojajaksoilla. Lumikerroksen paksuuteen ja sen vaikutukseen routaantumisen ja routimisessa vaikuttaa merkittävästi koekohteiden paikalliset olosuhteet, kuten sijainti ja maanpinnan topografia.



Kuva 5.29. Ilmatieteen laitoksen lumen syvyyshavainnot kenttämittauskohteita lähimpänä olevilta säähavaintoasemilta.

5.2 Laboratoriokokeet

5.2.1 Näytteiden rakeisuudet

Laboratoriokokeet tehtiin Karkun, Kiteen, Kuopion, Limingan, Paltamon, Varkauden ja Viialan koekohteiden näytemateriaaleille. Tornio- Kolari rataosalla sijaitsevien koekohteiden osalta laboratoriokokeet on tehty aiemman tutkimuksen yhteydessä ja laboratoriokokeiden tulokset on esitetty raportissa Hietala et al. (2010).

Raekokojakautuma

Routanousukokeiden jälkeen näytemateriaalit pesuseulottiin niiden rakeisuusjakautumien selvittämiseksi. Pesuseulontojen tulosten perusteella jokaisen näytteen rakeisuusjakautumista piirrettiin rakeisuuskäyrät. Rakeisuuskäyrissä on huomioitu myös yli 31,5 mm:n rakeet, mutta alusrakenne- ja pohjamaanäytteiden rakeisuuskäyrät eivät kerro yli 31,5 mm rakeiden jakautumista tarkemmin, koska alusrakenne- ja pohjamaanäytteiden yli 31,5 mm ainesta ei seulottu tarkemmin. Rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä 1. Tuki- ja alusrakennekerrosnäytteiden rakeisuuskuvaajissa on esitetty myös rakennekerrosten rakeisuusvaatimukset. Pesuseulontojen tuloksia ja rakeisuusvaatimuksia vertailemalla havaitaan, että tukikerrosnäytteet ovat uuden raidesepelin rakeisuusvaatimusta hienontuneempaa. Koekohteiden alusrakennenäytteet täyttävät kohtuullisesti rakennekerroksille asetetut nykyiset vaatimukset. Limingan näyte sisälsi kuitenkin liian paljon alle

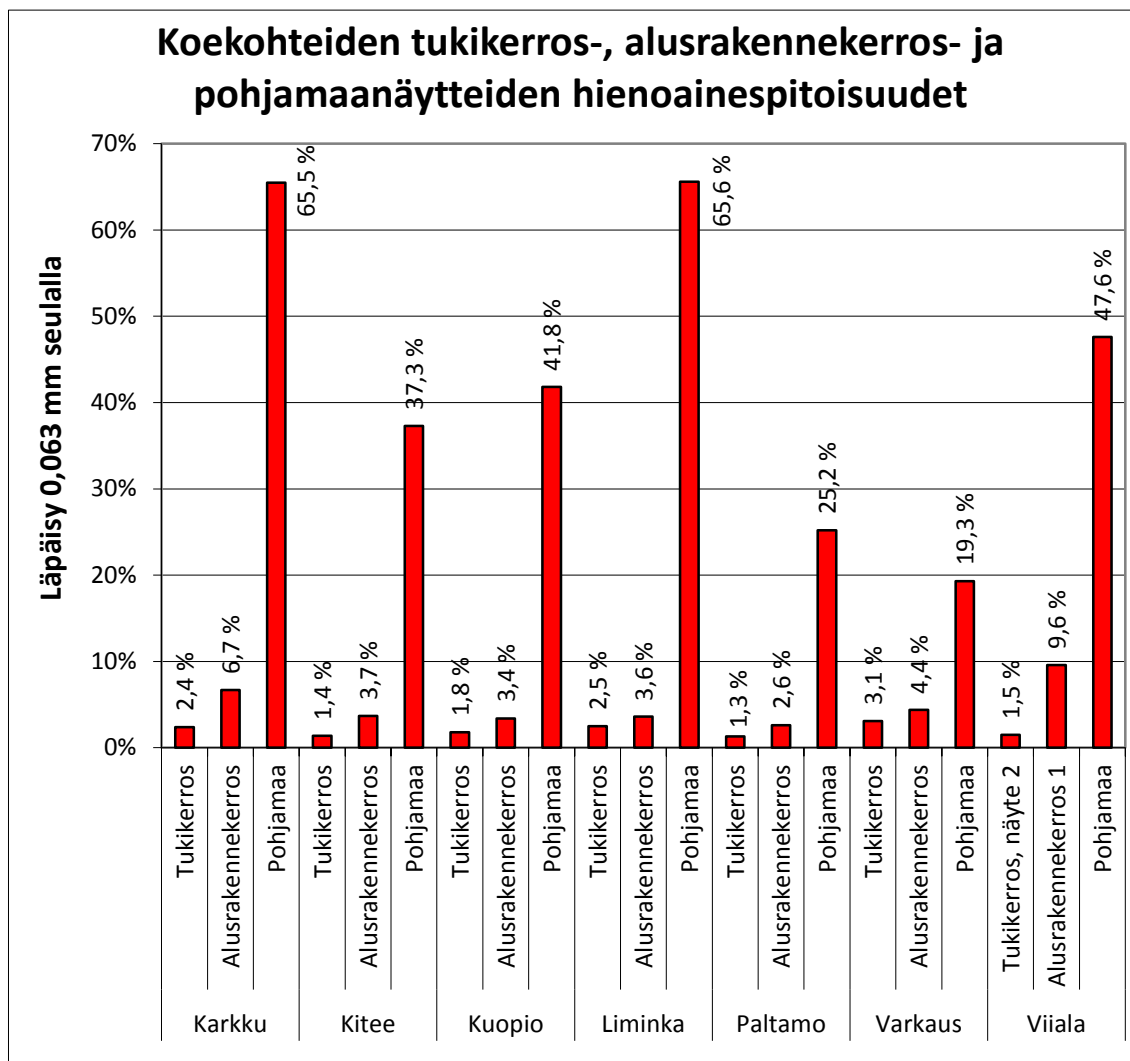
0,5 mm rakeita ja Viialan sekä Karkun koekohteiden alusrakennenäytteet sisälsivät liikaa hienoainesta.

Hienoaines

Hienoainespitoisuus on osoitettu (Nurmikolu 2006) merkittäväksi routimisherkkyyteen vaikuttavaksi tekijäksi. Routanousukokeessa olleiden näytekappaleiden hienoainespitoisuudet on esitetty kuvassa 5.30. Tukikerrosnäytteiden hienoainespitoisuudet vaihtelivat pääasiassa noin 3 % molemmin puolin. Koekohteiden tukikerrosnäytteiden rakeisuuskuvaajista havaitaan niiden sisältävän paljon hienoainesta. Hienoaineen suuri määrä tukikerroksessa selittyy raidesepelin hienontumisella käytössä.

Koekohteiden alusrakennekerrosten hienoainespitoisuus oli 4 % luokkaa Karkun ja Viialan koekohteita lukuun ottamatta, joiden hienoainespitoisuudet olivat huomattavan suuret: Karkussa 6,7 % ja Viialassa peräti 9,6 %. Tässä alusrakennekerrosta tutkitaan kerroksena, jonka väli- ja eristyskerros muodostavat yhdessä. Tarkemmissa alusrakennekerroksen analyyseissä alusrakennekerroksen yläosassa sijaitsevalta välikerrokselta vaadittaisiin alle 3 % hienoainespitoisuutta ja alusrakennekerroksen alaosassa olevalta eristyskerrokselta vaaditaan alle 4 % hienoainespitoisuutta (InfraRYL 2010). Tällä perusteella Karkun ja Viialan alusrakennemateriaalit sisälsivät liikaa hienoainesta. Pohjamaanäytteiden hienoainespitoisuudet ovat luonnollisesti rakennekerroksia korkeammat. Pohjamaanäytteiden suurimmat hienoainespitoisuudet havaittiin Karkun ja Limingan näytemateriaaleista, joissa hienoainespitoisuus oli yli 65 %.

Näytteiden hienoainespitoisuudet ja rakeisuusjakaumat on mitattu routanousukokeen jälkeen tehtävällä pesuseulonnalla. Näytemateriaalit ovat saattaneet hienontua vähän routanousukoekappaleiden valmisteluvaiheessa, kun materiaali on tiivistetty ICT-kiertotiivistimellä, mutta tästä aiheutuvan hienonemisen oletetaan olevan erittäin vähäistä. Nurmikolun (2006) tutkimuksessa näytemateriaalin tiivistyksestä ja käsittelystä syntyneet hienoainesmäärät vaihtelivat pääosin välillä 0,5-1,1 prosenttiyksikköä.



Kuva 5.30. Koekohteiden tukikerros-, alusrakennekerros ja pohjamaanäytteiden hienoainespitoisuudet huomioiden myös yli 31,5 mm rakeet.

5.2.2 Routanousukoe

Tulokset

Routanousukokeissa tutkittiin roudan monitorointikohteiden tuki- ja alusrakennekerroksista sekä pohjamaasta otettujen näytteiden routimisherkkyyttä. Näytteistä oli seulottu yli 31,5 mm rakeet pois. Routanousukoenäytteiden lähtötiedot on esitetty liitteessä 2. Yksittäisten näytteiden routanousukokeiden tulokset on myös esitetty tarkemmin liitteessä 3.

Tässä tutkimuksessa radan rakennekerros- ja pohjamaanäytteiden routimisherkkyyttä arvioitiin routanousukokeiden avulla. Routimisherkkyyden arviointiin käytetään näytteissä tapahtuvaa routanousua yhden (h_{24h}) ja neljän (h_{96h}) vuorokauden jäädytyksen jälkeen. Routimisherkkyyttä analysoidaan myös routanousukokeella määritettävän routimiskertoimen SP_0 avulla. Routanousukokeella voidaan määrittää myös routimisen voimakkuutta kuvaavia arvoja, kuten routanousunopeutta, joka tarkoittaa tapahtuvaa

routanousua tietyssä aikayksikössä tai routanoususuhdetta, joka kuvaa routanousun suhdetta jäätyneen kerroksen paksuuteen.

Routanousukokeessa mitattavat routanousut saadaan ajanhetkittäin tallentuvien siirtymäantureiden lukemien avulla ja routimiskerroin määritetään routanousukokeen tuloksena syntyvän roudan syvyyskuvaajan avulla. Routimiskertoimen määrittäminen perustuu routanousukokeen jakamiseen kahteen vaiheeseen routarajan etenemisvaiheen mukaan. Routimiskerroin määritetään kuvaajasta ajanhetkellä, jolloin routarajan etenemisvaihe pysähtyy ja routaraja pysyy samalla syvyydellä kokeen loppuun saakka. (Nurmikolu, 2006) Muutoskohdan tulkitseminen on usein epätarkkaa, koska vaiheiden muutos ei tapahdu yhtäkkiä vaan muutos tapahtuu hitaasti aikavälillä, joka riippuu materiaaliominaisuuksista.

Routanousukokeelle ei ole standardoitua menetelmää, mikä johtaa epäyhtenäisiin routivuuden luokittelumenetelmiin. Tässä tutkimuksessa on käytetty routivuuden testaus- ja luokittelumenetelminä aiemmissa tutkimuksissa (Nurmikolu, 2006) esiteltyjä menetelmiä. Taulukossa 5.1 on esitetty käytetty routimiskertoimen luokitteluasteikko routimiskertoimelle ja routanousuille. Tässä routivuuden luokittelussa lähtökohtana on, että routivuus on materiaaliominaisuus, koska muut routimisolosuhteet ovat lähes ihanteelliset. Routivalle näytteelle on turvattu esteetön lisäveden saanti ja vakioilämpötila, joka on pysyvästi pakkasella. Tällöin routanousun määrään vaikuttaa muuttujana ainoastaan näytteen materiaaliominaisuudet, koska näytekappaleet on valmistettu mahdollisimman samalla tavalla.

Taulukko 5.1. Routimiskertoimen luokittelu (Nurmikolu, 2006).

	Routimiskerroin SP_0 (mm²/Kh)	h_{24h} (mm)	h_{96h} (mm)
Routimaton	< 0,5	< 0,6	< 1,2
Lievästi routiva	0,5-1,6	0,6-2,2	1,2-3,7
Keskinkertaisesti routiva	1,6-3,3	2,2-4,5	3,7-7,4
Erittäin routiva	>3,3	> 4,5	> 7,4

Routivuuden luokittelu on menetelmänä teoreettinen ja Nurmikolu (2006) ehdottaakin routivuuden luokittelua käytännöllisen routimattomuuden avulla, jolloin tarkasteltaisiin vallitsevissa rakenteellisissa olosuhteissa sallittuja routanousuja ja niiden ylitysten seurauksia. Nurmikolu ehdottaa ratarakenteen rakennekerrosmateriaalien käytännöllisen routimattomuuden rajoiksi routimiskertoimen arvoa 1,1 mm²/Kh ja vastaavaa neljän vuorokauden routanousun arvoa 2,2 millimetriä. (Nurmikolu, 2006)

Routanousukoealaitteiston lämpötilasäädöt on automatisoitu ja ongelmakohdat voi havaita routanousukokeen tulokuvaajista selvinä poikkeamina. Tässä tutkimuksessa virheitä loivat satunnaiset lämpötila-anturien toimimattomuudet, jotka ilmenivät anturien virheellisinä mittausarvoina. Usein nämä virhetilanteet havaittiin viimeistään näytteen kylästysvaiheessa, jolloin laiteongelmat eivät vaikuttaneet kokeen lopputuloksiin.

Routimiskertoimen määrittämiseen syntyy merkitykseltään melko vähäistä epätarkkuutta näytteiden routiessa, jolloin paloittelun näytemuotin renkaat saattavat siirtyä routanousun mukana ja aiheuttavat lämpötila-anturien välisen etäisyyden kasvua. Tällöin routimiskertoimen arvon määrittäminen vääristyy hieman, mutta suurempi virhe routimiskertoimeen syntyy, kun arvioidaan routarajan vakioitumispaikkaa.

Routanousut ja routimisherkyys

Routanousukokeessa jokainen näytekappale routi, mutta osa vain vähän. Osa syntyneistä routanousuista on in-situ routanousua, joka syntyy materiaalin sisältämän veden jäädytyksessä ja laajentuessa. Pienin routanousu oli Paltamon tukikerroksessa havaittu 1,8 mm routanousu neljän vuorokauden jäädytyksen jälkeen ja suurin oli Kuopion koekohteen pohjamaan 43,8 mm routanousu neljän vuorokauden jäädytyksen jälkeen. Routanousukokeen tulokset on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2. Routanousukokeiden tulokset ja koekappaleiden hienoainespitoisuudet, kun näytteistä on poistettu yli 31,5 mm rakeet.

erittäin routiva keskinkertaisesti routiva lievästi routiva routimaton		Läpäisy % 0,063 mm seulalla	Routanousu [mm]1 vrk jäädytyksen jälkeen	Routanousu [mm] 4 vrk jäädytyksen jälkeen	Routimis- kerroin [mm ² /Kh]
Karkku	Tukikerros	4,5 %	2,0	5,0	3,9
	Alusrakennekerros	8,2 %	8,5	18,2	9,8
	Pohjamaa	65,5 %	5,4	23,3	10,1
Kitee	Tukikerros	3,7 %	1,1	1,9	0,4
	Alusrakennekerros	4,3 %	3,3	6,1	3,2
	Pohjamaa	37,3 %	8,4	22,3	13,9
Kuopio	Tukikerros	5,0 %	2,0	5,5	1,5
	Alusrakennekerros	3,6 %	5,1	9,3	4,8
	Pohjamaa	43,5 %	17,4	43,8	25,1
Liminka	Tukikerros	6,8 %	3,8	6,8	2,4
	Alusrakennekerros	3,7 %	1,8	3,9	1,8
	Pohjamaa	65,6 %	9,9	28,2	10,2
Paltamo	Tukikerros	3,1 %	0,6	1,8	0,4
	Alusrakennekerros	2,7 %	1,3	2,9	2,0
	Pohjamaa	29,1 %	18,8	35,3	24,8
Varkaus	Tukikerros	4,8 %	2,4	4,3	1,9
	Alusrakennekerros	5,2 %	4,8	8,3	3,3
	Pohjamaa	20,1 %	17,4	37,2	20,1
Viiala	Tukikerros	4,8 %	2,2	4,1	2,0
	Alusrakennekerros	11,3 %	11,4	20,1	11,2
	Pohjamaa	50,0 %	4,5	21,7	9,5

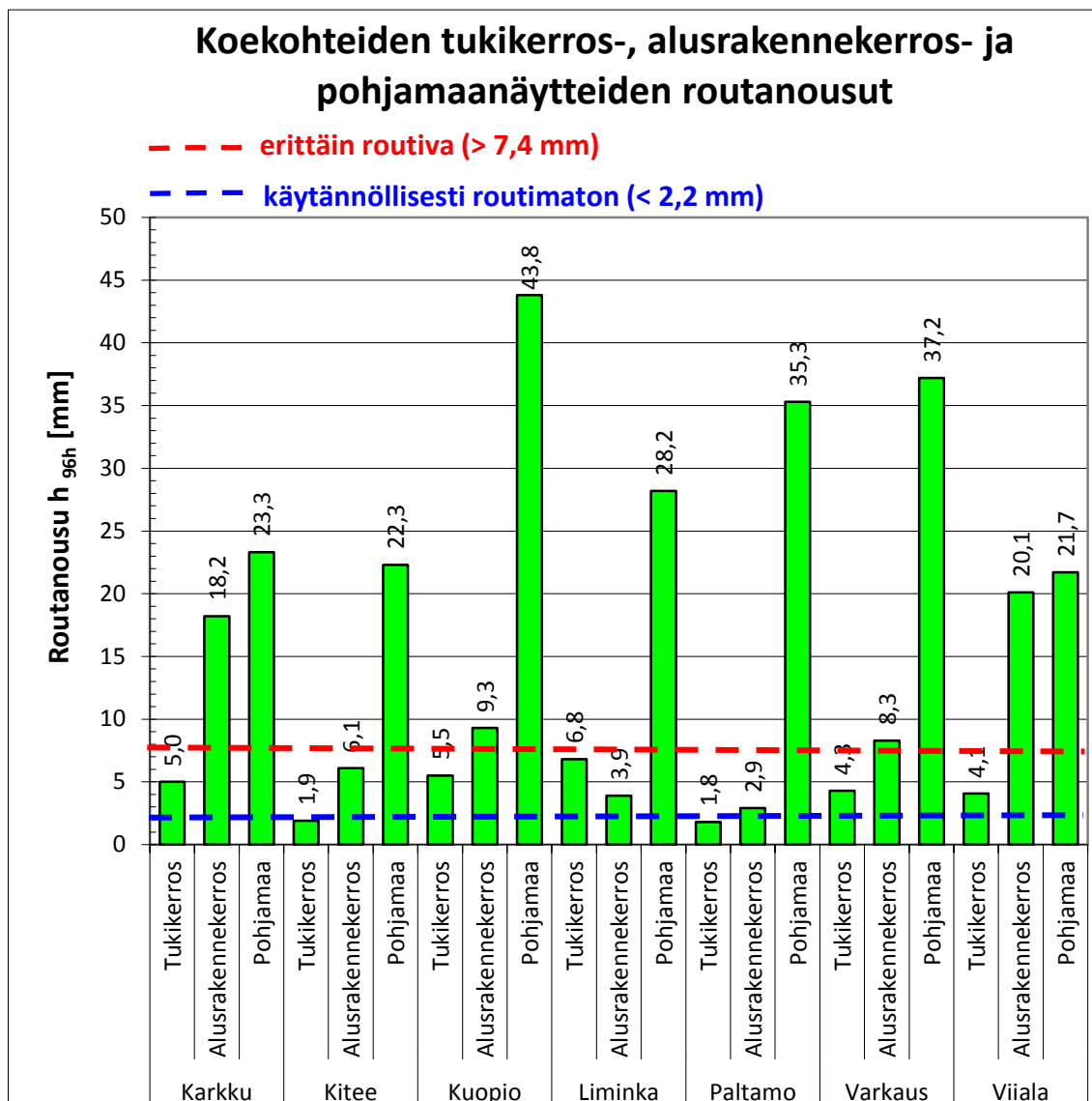
Routanousukokeessa tapahtuneiden neljän vuorokauden jäädytyksen jälkeisten routanousujen perusteella koekohteiden kaikkien rakennekerrosten ja pohjamaiden materiaalit ovat vähintään keskinkertaisesti routivia ja suurin osa erittäin routivia, kun käytetään taulukon 5.1. mukaista luokittelua.

Routanousukokeessa tapahtuneiden yhden vuorokauden jälkeisten routanousujen perusteella kaikkien koekohteiden rakennekerrosmateriaalit ovat vähintään lievästi routivia ja noin puolet on erittäin routivia materiaaleja. Tukikerrosnäytteet ovat yhden vuorokauden jäädytyksen jälkeen luokiteltavissa lievästi routiviksi, paitsi Limingassa tukikerros on keskinkertaisesti routiva. Limingan, Kiteen ja Paltamon alusrakennemateriaalia sekä Viialan pohjamaata lukuun ottamatta alusrakennekerrosmateriaalit ja pohjamaat ovat erittäin routivia taulukon 5.1. luokittelun perusteella. Viialan pohjamaan vähäinen routivuus yhden vuorokauden jäädytyksen jälkeen voi johtua näytteen hitaasta routivuudesta, koska neljän vuorokauden jäädytyksen jälkeen näytteessä havaitaan suuri routanousu.

Kuvaajassa 5.32 on esitetty routanousukokeessa neljän vuorokauden jäädytyksessä tapahtuneet routanousut, joita verrataan ehdotettuihin käytännöllisen routimattomuuden rajoihin. Luokittelun perusteella Kiteen ja Paltamon tukikerrosnäytteet voidaan luokitella käytännöllisesti routimattomiksi, mutta loput ovat routivia. Kaikki pohjamaamateriaalit ovat luokittelun perusteella erittäin routivia ja samoin Karkun, Kuopion, Varkauden ja Viialan alusrakennenäytteet. Kuvassa 5.31 on routanousukokeessa olleita pohjamaanäytteitä, joista mitattiin suurimpia routanousuja.



Kuva 5.31. Routineita pohjamaanäytteitä: Varkaus, Kitee, Kuopio ja Viiala.

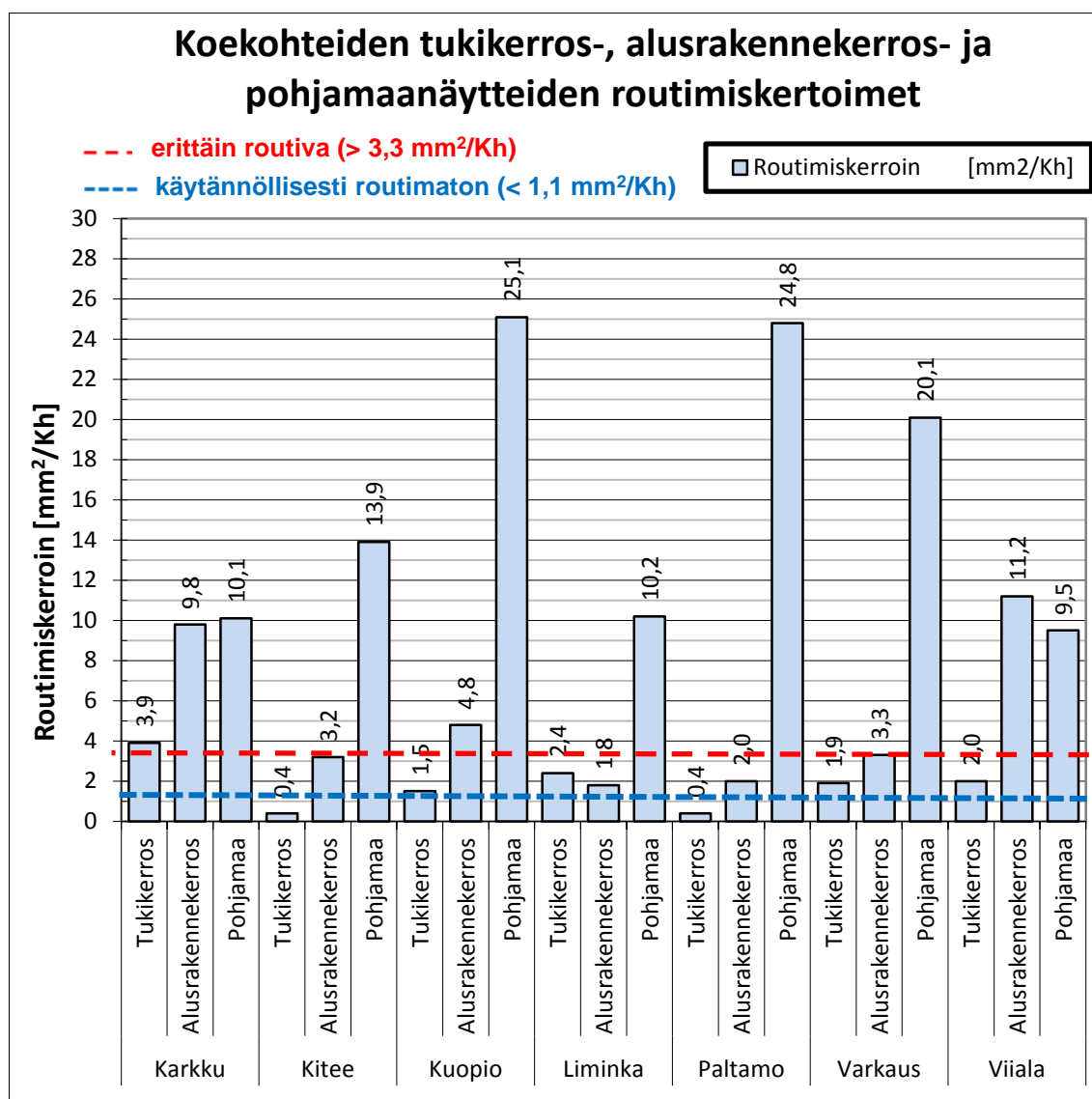


Kuva 5.32. Routanousukokeessa määritetyt koekohteiden tukikerros-, alusrakennekerros- ja pohjamaanäytteiden routanousut 4 vrk jäädytyksen jälkeen.

Käyttämällä taulukon 5.1 tai käytännöllisen routimattomuuden mukaista luokittelua neljän vuorokauden jäädytyksen jälkeisille routanousuille, voidaan havaita lähes kaikkien routimattomiksi suunniteltujen radan rakennekerrosmateriaalien olevan routivia. Koetulosten perusteella käytännöllisen routimattomuusluokittelun raja-arvot routimattomalle maamateriaalille ovat erittäin tiukat, koska vain Kiteen ja Paltamon tukikerrosnäyttemateriaalit täyttävät käytännöllisen routimattomuusluokitteluvaatimuksen.

Luokittelemalla radan rakennekerrosnäytteet routimiskertoimen avulla käyttämällä taulukon 5.1 raja-arvoja, saadaan osalle näytteistä ristiriitaiset routivuusluokittelut verrattuna routanousujen avulla tehtyihin luokitteluihin. Erittäin ja keskinkertaisesti routiviksi luokitellut näytteet ovat myös routimiskertoimen avulla erittäin tai keskinkertaisesti routivia, mutta Kiteen ja Paltamon tukikerrosnäytteet ovat routimattomia, kun routanousujen perusteella arvioitaessa ne ovat lievästi tai keskinkertaisesti routivia.

Käyttämällä Nurmikolun (2006) käytännöllisesti routimattoman materiaalin luokittelua routimiskertoimelle, saadaan kuvaajan 5.33 mukaiset tulokset. Routimiskertoimeen perustuvat käytännöllisen routimattomuuden raja-arvot ovat routimattomalle materiaalille alle $1,1 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ ja erittäin routivalle materiaalille routimiskerroin on yli $3,3 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Tämän luokittelutavan tulokset vastaavat hyvin neljän vuorokauden jäädytyksen jälkeisten routanousujen perusteella tehtyjen käytännöllisen routivuuden luokittelun tuloksia eli kuvaajan 5.32 tulokset ovat hyvin samankaltaiset kuvaajan 5.33 kanssa.

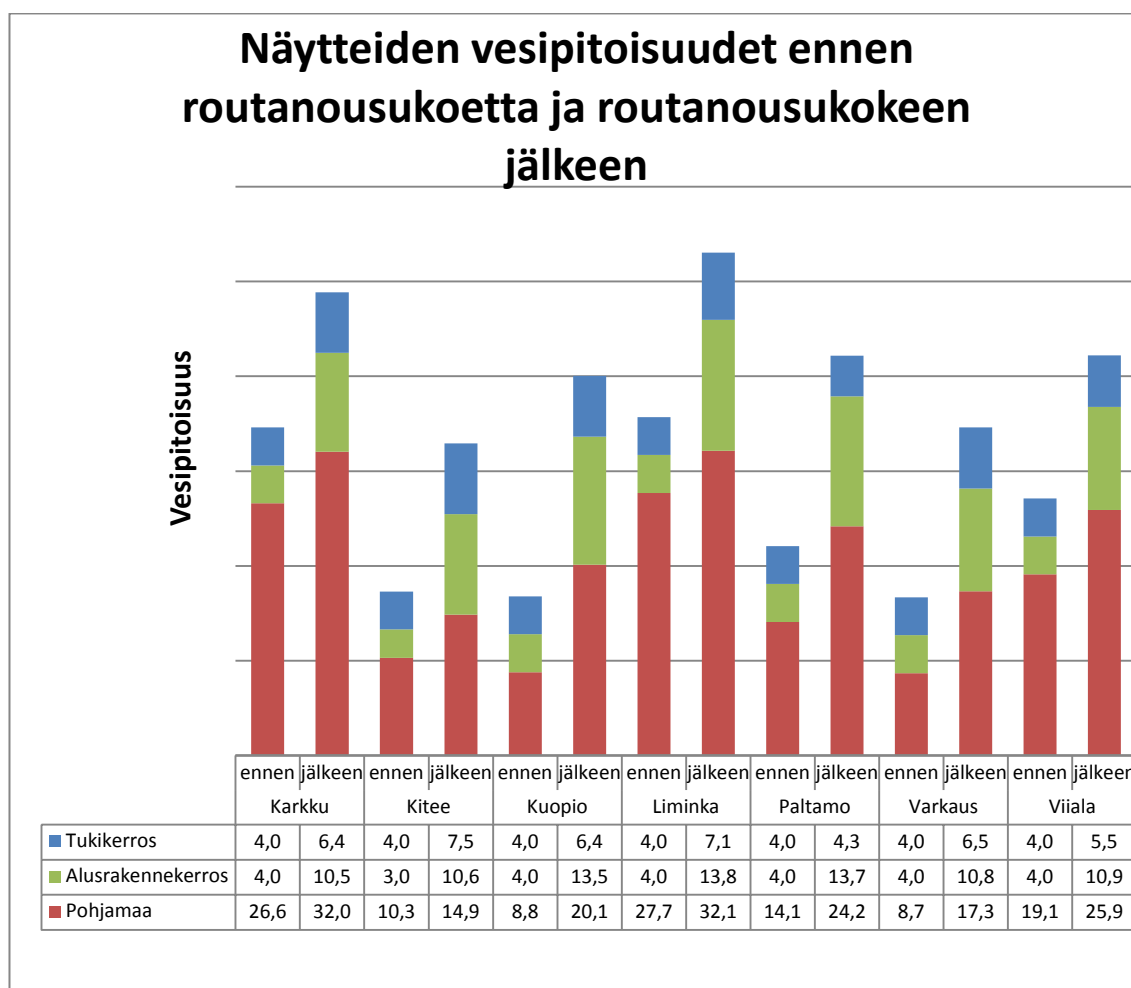


Kuva 5.33. Routanousukokeessa määritetyt koekohteiden tukikerros-, alusrakennekerros- ja pohjamaanäytteiden routimiskertoimet 4 vrk jäädytyksen jälkeen.

5.2.3 Routanousukoe-kappaleiden vesipitoisuudet

Routanousukokeissa olleiden radan rakennekerrosnäytteiden vesipitoisuudet on esitetty seuraavissa kuvissa. Kuvassa 5.34 esitetään näytteiden vesipitoisuudet ennen routanousukoetta ja routanousukokeen jälkeen. Tuki- ja alusrakennenäytteet olivat kuivia ennen routanousukoenäytteiden tiivistämistä ja näytteisiin lisättiin tiivistämisvaiheessa sopiva

vesimäärä. Pohjamaanäytteet olivat luonnollisessa kosteustilassaan ennen routanousukoetta. Routanousukokeen alussa näytekappaleet kyllästettiin vedellä ja ennen jäädytysvaiheen alkua vedenpinta laskettiin 12 mm näytteiden alapinnan yläpuolelle, jotta näytekappaleet saavat lisävettä kokeen aikana. Kuvaajassa esitetty routanousukokeen jälkeinen vesipitoisuus on koko näytteen keskimääräinen vesipitoisuus. Kuvaajasta havaitaan alusrakennekerrosnäytteiden sitovan eniten vettä itseensä routanousukokeen aikana.

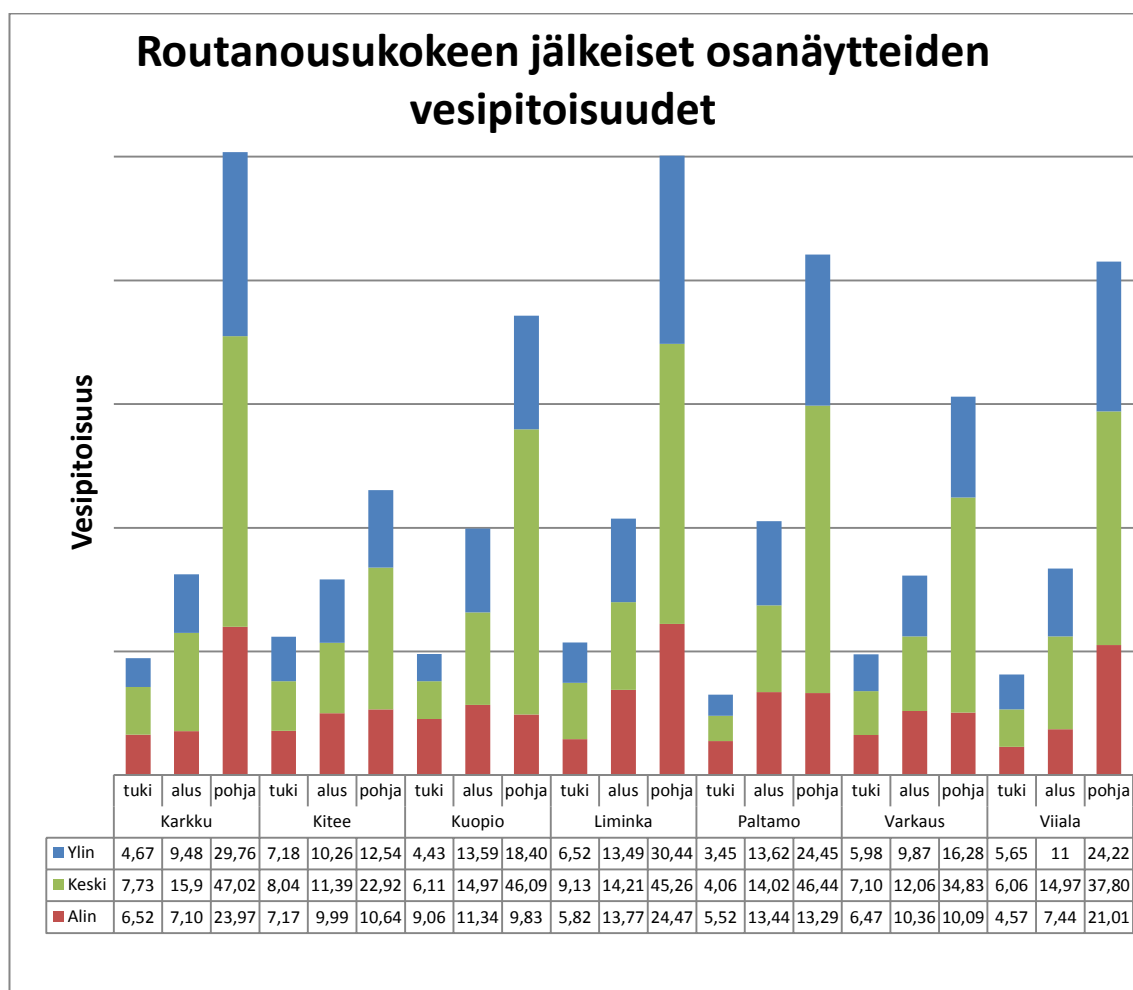


Kuva 5.34. Näytteiden vesipitoisuudet ennen routanousukoetta ja routanousukokeen jälkeen.

Routanousukokeen jälkeen näytekappaleet paloiteltiin kolmeen osaan niiden vesipitoisuuden jakautuman selvittämiseksi. Alin kerros on koekappaleen routanousuko-
keessa sulana pysynyt osa. Kokeessa jäänyt kerros jaettiin kahteen osaan, joista alem-
pi on koko näytteen keskiosa ja ylempi on näytteen ylin osa. Ennen routanousukoetta
näytteen jokaisella osalla on ollut likimäärin sama vesipitoisuus. Vesipitoisuuden jakau-
tumisesta luodusta kuvaajasta nähdään selkeästi pohjamaanäytteiden sitovan itseensä
tuki- ja alusrakennenäytteitä enemmän vettä. Kuvaajasta 5.35 voidaan havaita näyttei-
den keskiosien sitovan kokeen aikana itseensä eniten vettä, mikä johtuu juuri tähän ker-

rokseen syntyvästä jäälinssistä. Suurimmat näytteen keskiosan vesipitoisuuden kasvut tapahtuvat routivilla pohjamailla, joihin syntyy suurimmat routanousuja aiheuttavat jäälinssit. Alimman kerroksen vesipitoisuus on ylempiä kerroksia pienempi, koska ylemmät kerrokset imevät näytteen alaosaan kautta lisävetä jäätyvään vyöhykkeeseen ja koska alin osa ei roudi.

Korkeampaa routanousukoeakappaletta käyttämällä vesipitoisuuden jakautumisen selvittäminen olisi varmempaa ja mahdollistaisi jakautumisen tarkemman tulkinnan.



Kuva 5.35. Routanousukokeen jälkeiset osanäytteiden vesipitoisuudet kolmeen osaan paloitellussa näytekappaleessa.

6 TULOSTEN ANALYSOINTI

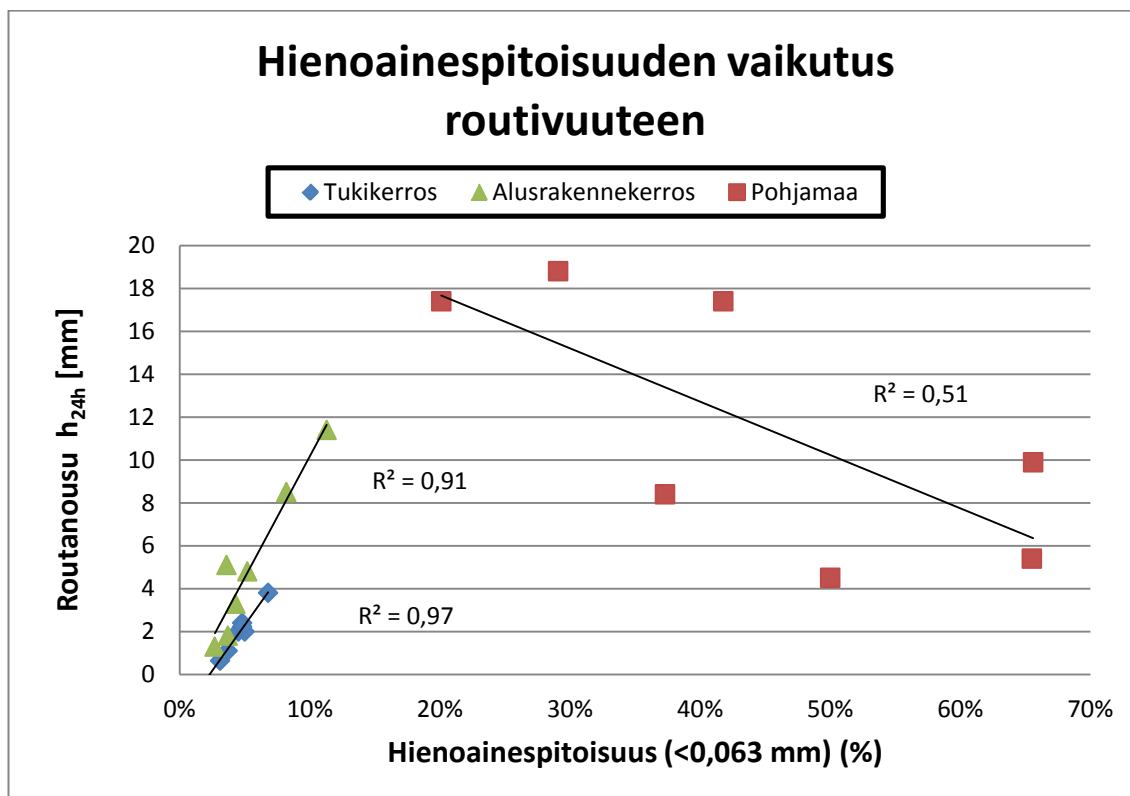
6.1 Hienoainespitoisuuden vaikutus routivuuteen

Koekohteiden ratarakennekerrosten ja pohjamaiden hienoainespitoisuuksien ja routanousujen sekä hienoainespitoisuuksien ja routimiskertoimen välillä havaitaan selvää riippuvuutta. Tulokset hienoainespitoisuuden vaikutuksesta materiaalin routivuuteen on esitetty kuvissa 6.1- 6.3. Kuvassa 6.1 on esitetty tuki-, alusrakennekerros ja pohjamaanäytteiden hienoainespitoisuuden vaikutus routanousukokeessa havaittuun routanousuun yhden vuorokauden jäädytyksen jälkeen. Kuvassa 6.2 on esitetty vastaavasti tuki-, alusrakennekerros ja pohjamaanäytteiden hienoainespitoisuuden vaikutus routanousukokeessa havaittuun routanousuun neljän vuorokauden jäädytyksen jälkeen. Kuvassa 6.3 on esitetty tuki-, alusrakennekerros ja pohjamaanäytteiden hienoainespitoisuuden vaikutus routanousukokeessa havaittuun routimiskertoimeen. Kuvissa 6.1 ja 6.2 ratarakenteen tuki- ja alusrakennekerrosnäytteiden hienoainespitoisuudet korreloivat hyvin yhden ja neljän vuorokauden jälkeisten routanousuihin. Erityisesti tuki- ja alusrakennekerrosnäytteiden hienoainespitoisuus korreloi mitattujen yhden vuorokauden jälkeisten routanousujen kanssa. Kuvassa 6.3 alus- ja tukikerroksen hienoainespitoisuudet korreloivat kuitenkin heikosti routanousukokeesta tulkittujen routimiskertoimien kanssa. Pohjamaanäytteiden hienoainespitoisuus ei merkittävästi korreloi routanousujen tai routimiskertoimen kanssa. Pohjamaiden kohdalla laskeva regressiosuora johtuu siitä, että paljon hienoainesta sisältävät savimaalajit routivat vähemmän savilajitetta sisältäviä maalajeja vähemmän. Kuvaajiin merkityt R^2 -arvot kuvaavat selitysasteita ja näistä saadaan korrelaatiokertoimet ottamalla neliöjuuri selitysasteesta.

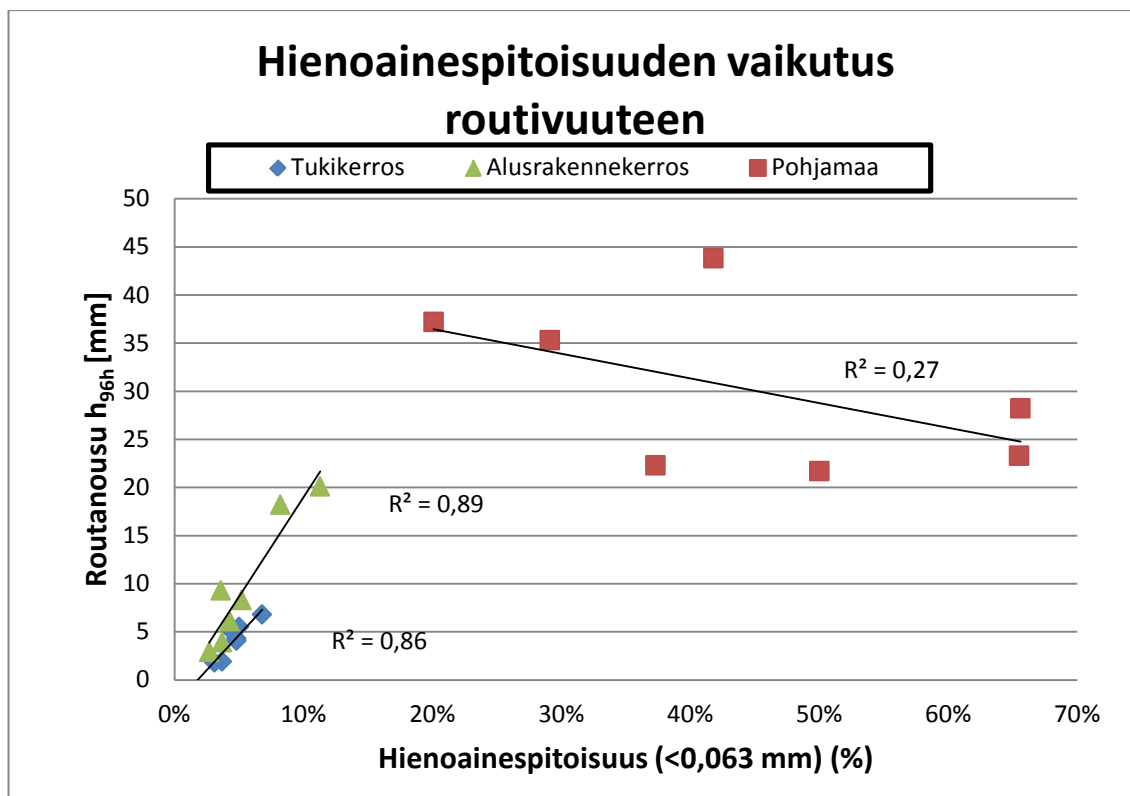
Koekohteiden tukikerrosten hienoainespitoisuuden ja yhden sekä neljän vuorokauden routanousujen välillä havaitaan 0,98 ja 0,93 korrelaatiokertoimet. Koekohteiden alusrakennekerrosten hienoainespitoisuuden ja yhden sekä neljän vuorokauden routanousujen välillä havaitaan suuret 0,96 ja 0,94 korrelaatiokertoimet. Routanousukokeen perusteella arvioitavien tuki- ja alusrakennekerrosten routimiskertoimien ja hienoainespitoisuuksien välillä ei havaita routanousujen tapaista selvää korrelaatiokerrointa. Korrelaatiokertoimiksi saatiin 0,52 ja 0,94. Routimiskertoimien ja hienoainespitoisuuksien väliseen korrelaatioon tuo epävarmuutta routimiskertoimen vaikea määrittäminen.

Muodostamalla jatkuvan käyrän kuvien 6.1 ja 6.2 tuki-, alusrakenne- ja pohjamaiden havaintopisteiden välille havaitaan käyrän muodon noudattavan kuvan 3.3. veden virtausnopeuden käyrää maalajien vaihtelun mukaisesti. Kuvassa 6.4 on esitetty esimerkkinä routanousukokeessa 24 tunnin jäädytyksen kohdalla maamateriaalin hienoainespitoisuuden ja routivuuden yhteys maalajin veden virtausnopeuteen. Karkeissa alus- ja tukikerrosmateriaaleissa vesi ei pysty juurikaan virtaamaan jäätymisvyöhykkeeseen.

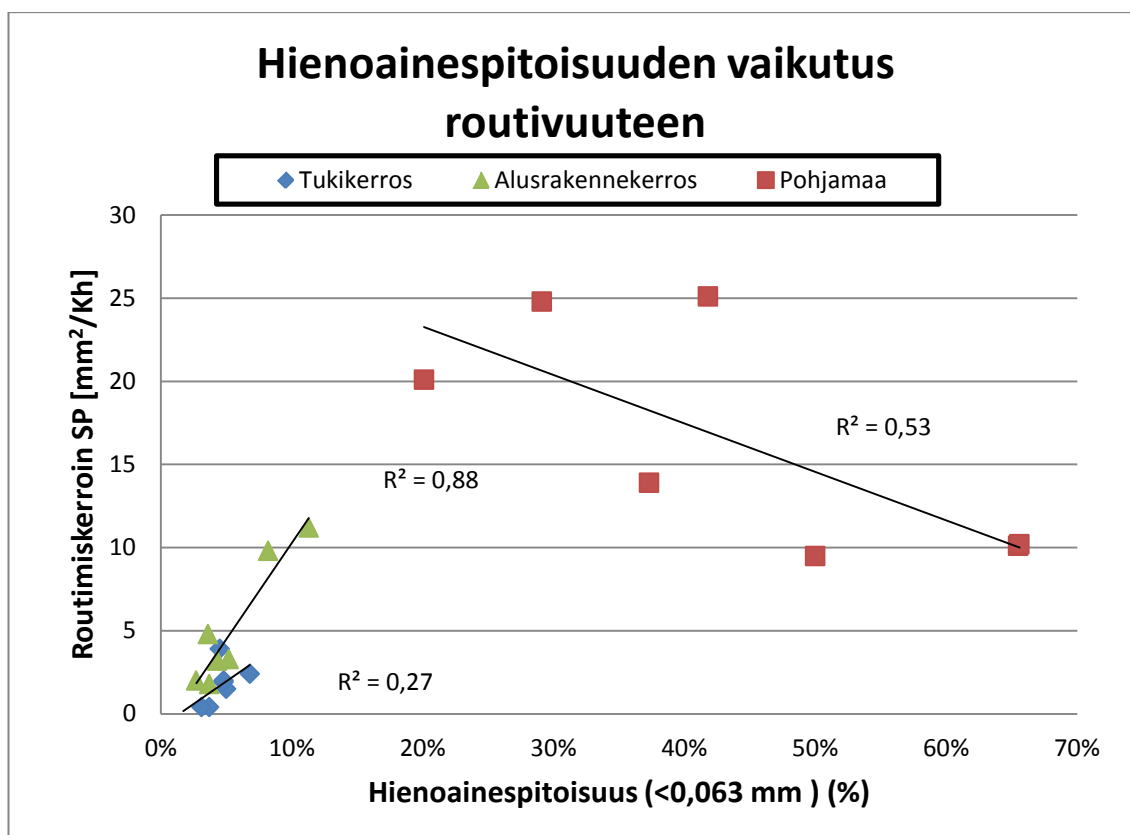
seen, mutta hienorakeisemmissa savisissa ja varsinkin silttisissä pohjamaissa veden virtaus on suurta vähentyen kuitenkin kaikkein suurimmilla hienoainespitoisuuksilla.



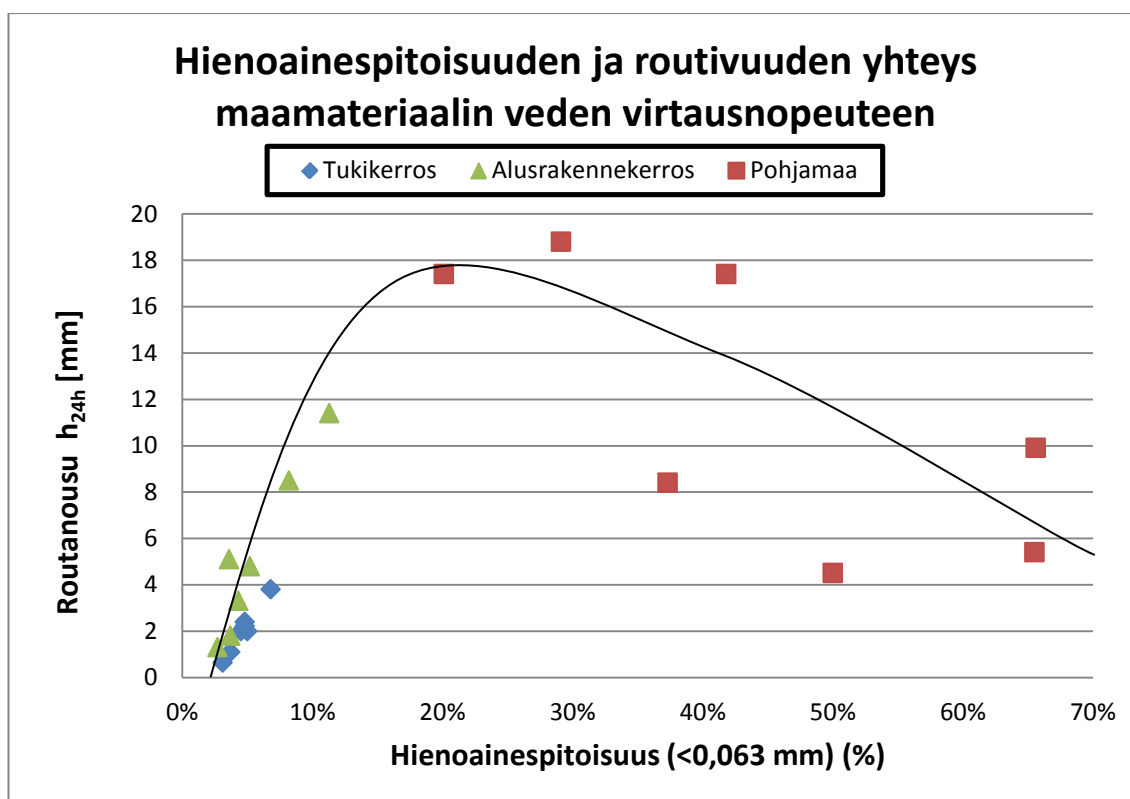
Kuva 6.1. Routanousukoenäytteestä mitatun hienoainespitoisuuden vaikutus routanousukokeessa havaittuun routanousuun 24 tunnin kohdalla.



Kuva 6.2. Routanousukoenäytteestä mitatun hienoainespitoisuuden vaikutus routanousukokeessa havaittuun routanousuun 96 tunnin kohdalla.



Kuva 6.3. Routanousukoenäytteestä mitatun hienoainespitoisuuden vaikutus routanousukokeessa havaittuun routimiskertoimeen.



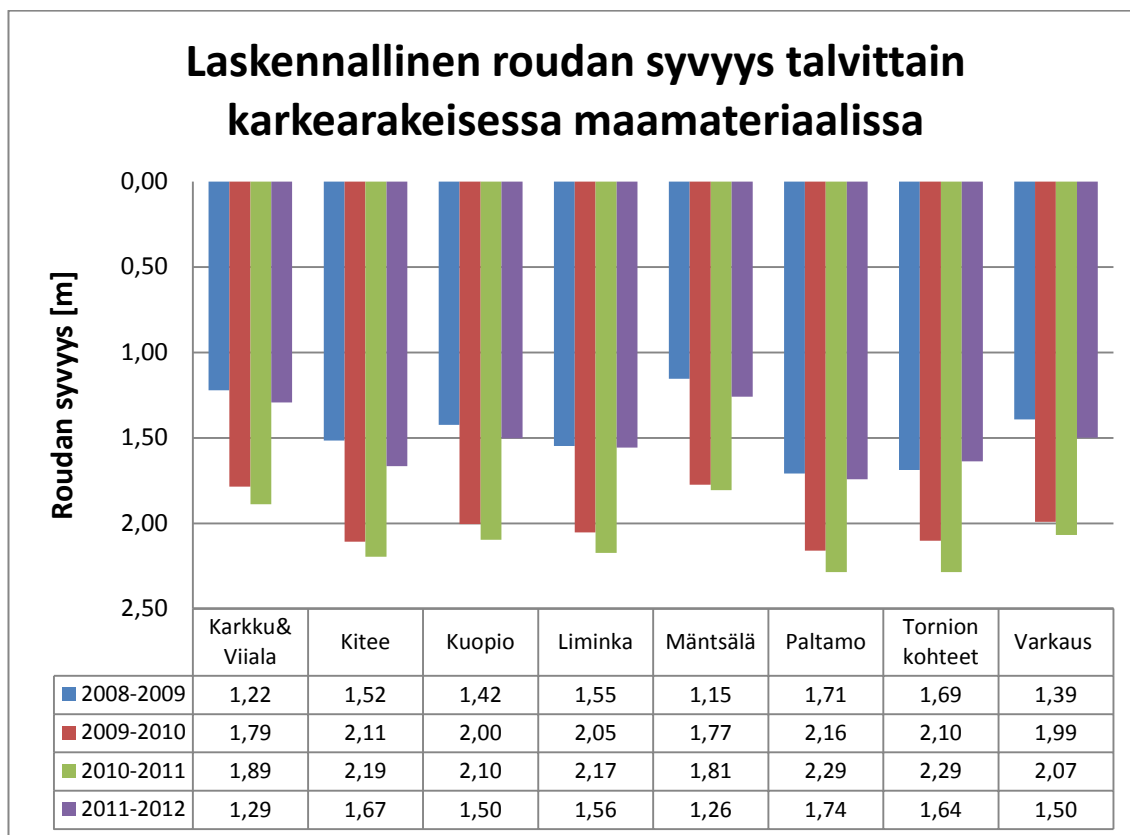
Kuva 6.4. Routanousukoenäytteestä mitatun hienoainespitoisuuden ja routivuuden yhteys maamateriaalin veden virtausnopeuteen 24 tunnin kohdalla.

6.2 Havaitun ja laskennallisen roudan syvyyden vertailu

Tässä luvussa vertaillaan koekohteilla havaittua roudan syvyyttä laskennalliseen roudan syvyyteen. Roudan syvyyttä on perinteisesti arvioitu vuosittaisen pakkasmäärän perusteella. Yleisin ja yksinkertaisin laskentamalli on Stefanin kaava, joka on esitetty luvussa 3.4.2 kaavassa (1).

Stefanin kaavassa on käytetty $k:n$ arvona karkearakeisen maalajin maalajikerrointa (Soveri ja Johansson 1966, Ehrola 1996) 0,0115, koska ratarakenteessa oletetaan olevan karkearakeisia maalajeja. Maalajikertoimen k arvot on määritetty kenttähavaintojen perusteella, minkä takia maalajikertoimen arvot toimivat luotettavasti ainoastaan tutkimuksen perusteena olevien kenttähavaintopaikkojen routimis- ja ilmasto-olosuhteissa (Soveri ja Johansson 1966, Ehrola 1996). Laskennallisesti määritetyn roudan syvyysarvon pitäisi olla roudan maksimitunkeutumissyvyys, koska pohjamaassa maalaji muuttuu todennäköisesti hienommaksi, jolloin maalajikertoimenä voitaisiin käyttää hienorakeisen maalajin arvona 0,0085, joka pienentäisi merkittävästi roudan tunkeutumissyvyyttä. Stefanin kaava ei huomioi maassa olevaa lumikerrosta, joka eristää ratarakenteen kylmästä ilmasta ja vähentää siten roudan tunkeutumissyvyyttä. Lumen syvyyden vaikutusta roudan syvyyteen on mahdollista arvioida korjauskertoimien avulla, mutta korjauskertoimien käyttö on jätetty laskelmista pois. Ratarakenteen päällä ei voi olla paksua lumikerrosta junaliikenteestä johtuen, mutta ohuella lumikerroksella on merkitystä. Ratapenkereen sivuille lunta on voinut kerääntyä eristämään ratara-

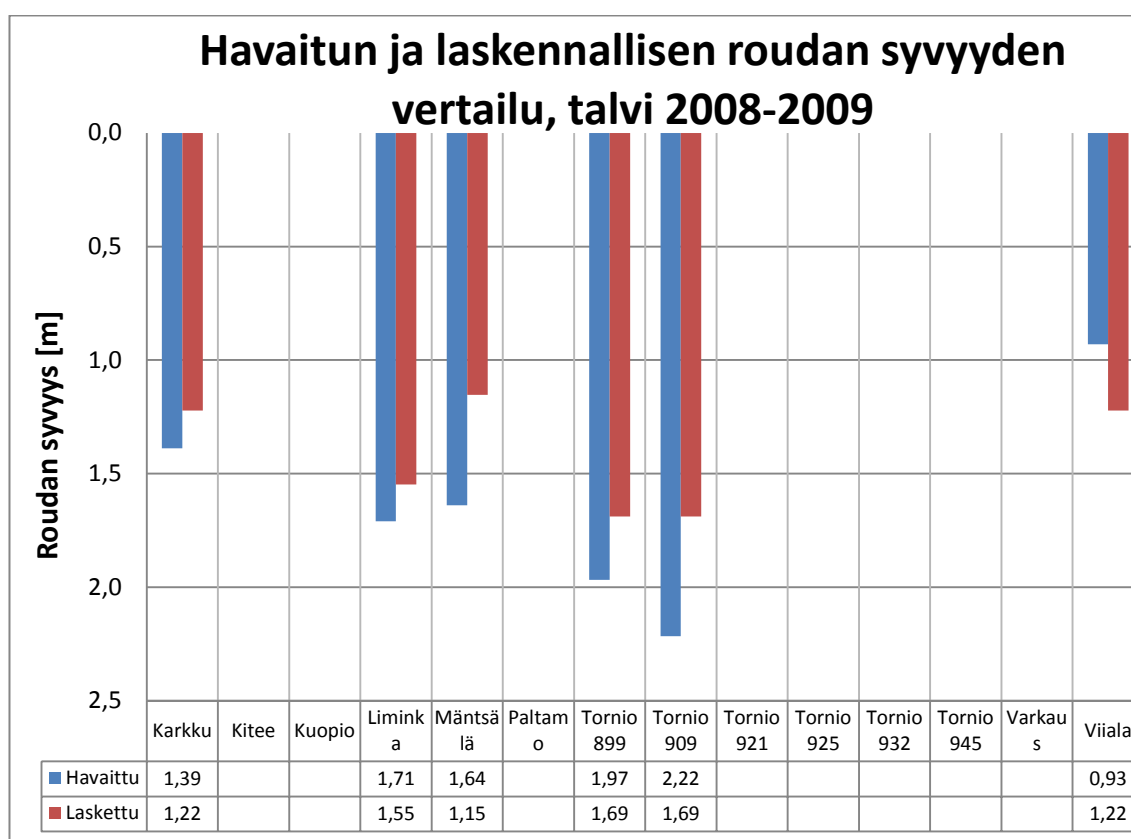
kennetta ilmasta. Stefanin kaavalla lasketut roudan syvyydet talvien pakkasmäärien perusteella on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.5. Stefanin kaavalla lasketut roudan maksimisyvyydet kenttämittauskohteilla havaittujen pakkasmäärien perusteella karkearakeisessa maamateriaalissa.

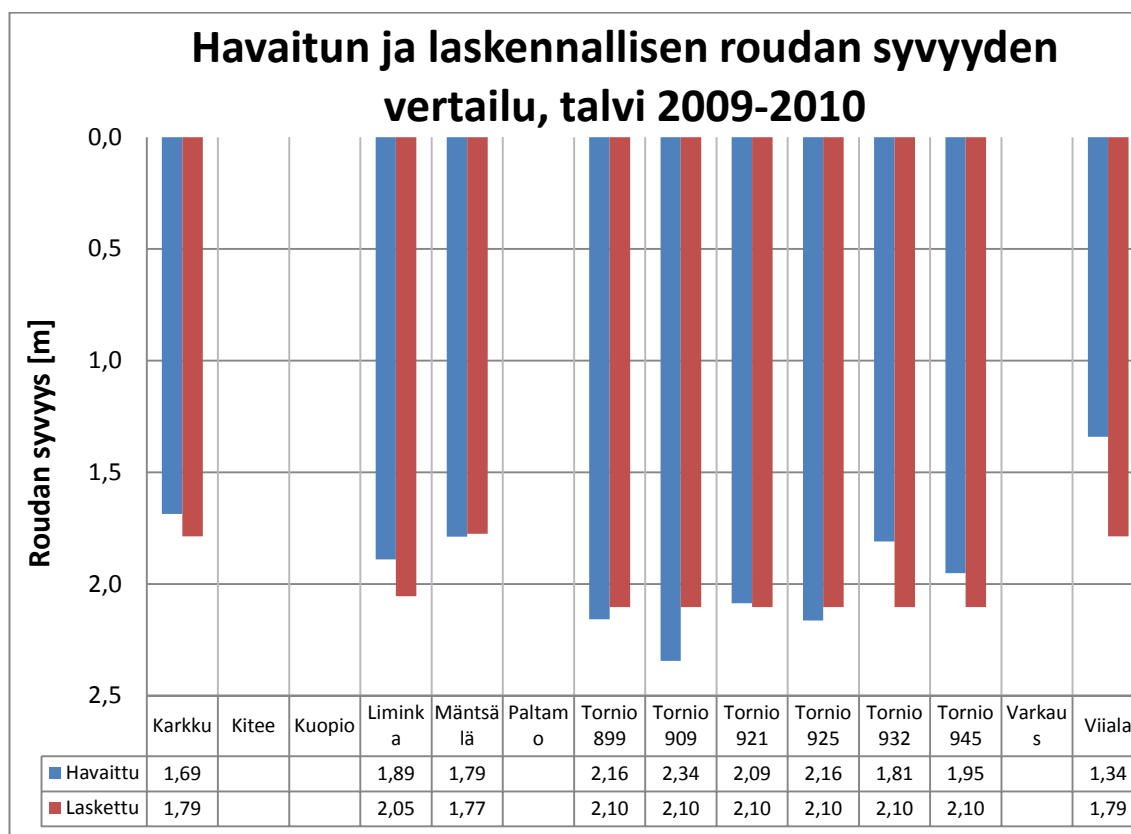
Stefanin kaavalla lasketut koekohteiden laskennalliset roudan syvyydet on esitetty alla olevissa kuvaajissa 6.6 – 6.9 talvittain. Jokaisen roudan monitorointikohteen havaittu roudan syvyys on esitetty sinisellä palkilla ja laskennallinen roudan syvyys on esitetty punaisella palkilla havaitun roudan vieressä. Tyhjä ruutu kuvaajan alla olevassa taulukossa tarkoittaa, ettei monitorointiasemalta ole ollut saatavissa mitaushavaintoa.

Talven 2008–2009 kuvaajasta havaitaan mitatun roudan syvyyden olevan laskennallista roudan syvyyttä suurempi lukuun ottamatta Viialan kohdetta. Suurin ero on Tornion 909 roudan monitorointiasemalla, jossa ero on yli 0,5 metriä. Suurentamalla maalajikertoimen k arvoa mitattu ja laskettu roudan syvyys täsmäisivät paremmin toisiinsa. Jos radan rakennekerroksissa olisi käytetty louhetta, voidaan maalajikertoimelle antaa arvo 0,015 (Soveri ja Johansson 1966, Ehrola 1996). Mitatun ja lasketun roudan syvyyden eron todennäköinen selittäjä on kuitenkin ratarakenteessa oleva kosteuspitoisuus, jonka vaikutuksista ei ole tarkkaa tietoa. Ratarakenteen päällä oleva lumikerros ei selitä laskennallisen ja mitatun roudan syvyyden välisiä eroja, koska mitatun roudan syvyyden pitäisi olla laskettua roudan syvyyttä pienempi, jos monitorointikohteella on paksu lumikerros. Viialan koekohteen havaittua roudan syvyyttä suurempi roudan laskennallinen tunkeutumissyvyys johtuu todennäköisesti Viialan koekohteen ratarakenteesta olevasta eristyslevystä.



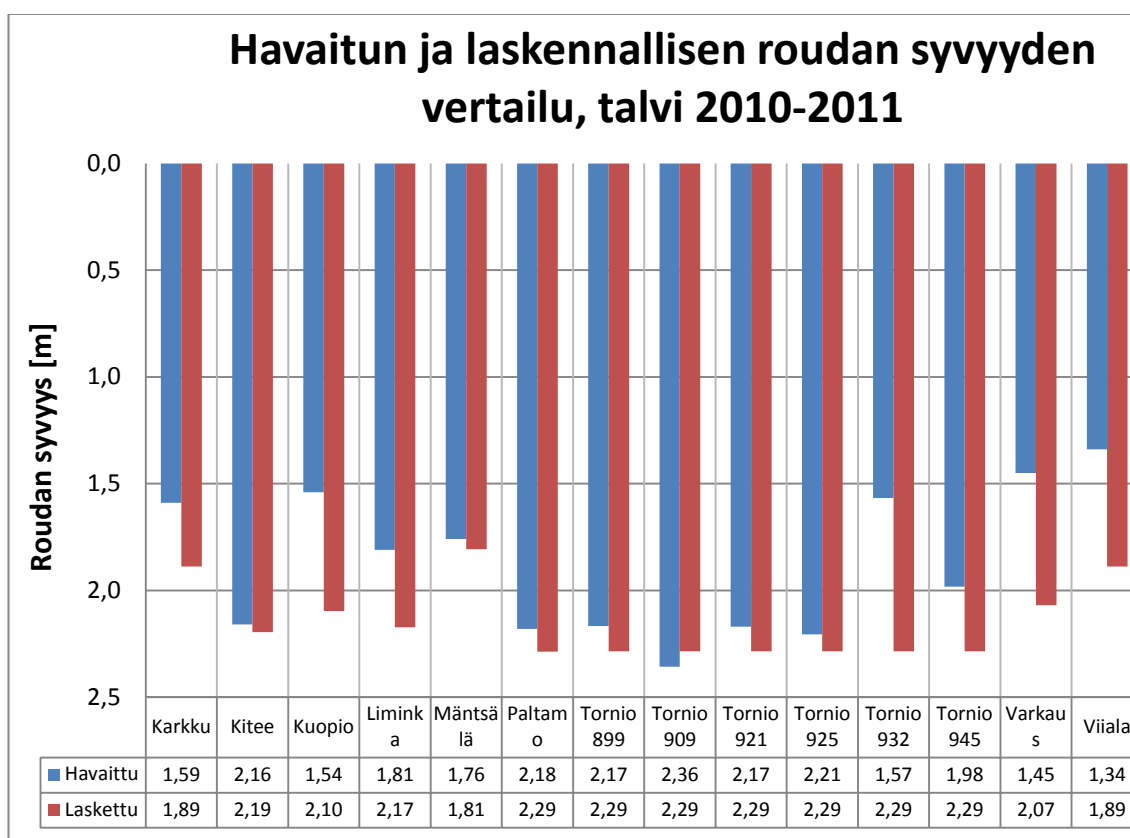
Kuva 6.6. Roudan seurantakohteilla havaitun roudan syvyyden vertailu vastaavan talven pakkasmäärän perusteella laskettuun roudan syvyyteen talvella 2008–2009.

Talven 2009–2010 kuvaajasta havaitaan mitattujen ja laskennallisten roudan syvyyksien täsmäävän kohtuullisesti. Suurimmat erot ovat Viialan ja Tornion 909 kohteilla. Laskennallinen roudan syvyys on useimmilla roudan monitorointikohteilla mitattua roudan syvyyttä suurempi, kuten oletettiin. Laskennallista roudan syvyyttä pienempi mitattu roudan syvyys johtuu todennäköisesti mahdollisen lumipeitteen eristävyvyydestä tai ratarakenteen kosteustilasta. Viialan ja Limingan kohteiden havaittua roudan syvyyttä suurempi roudan laskennallinen tunkeutumissyvyys johtuu todennäköisesti kohteiden ratarakenteessa olevasta eristyslevystä.



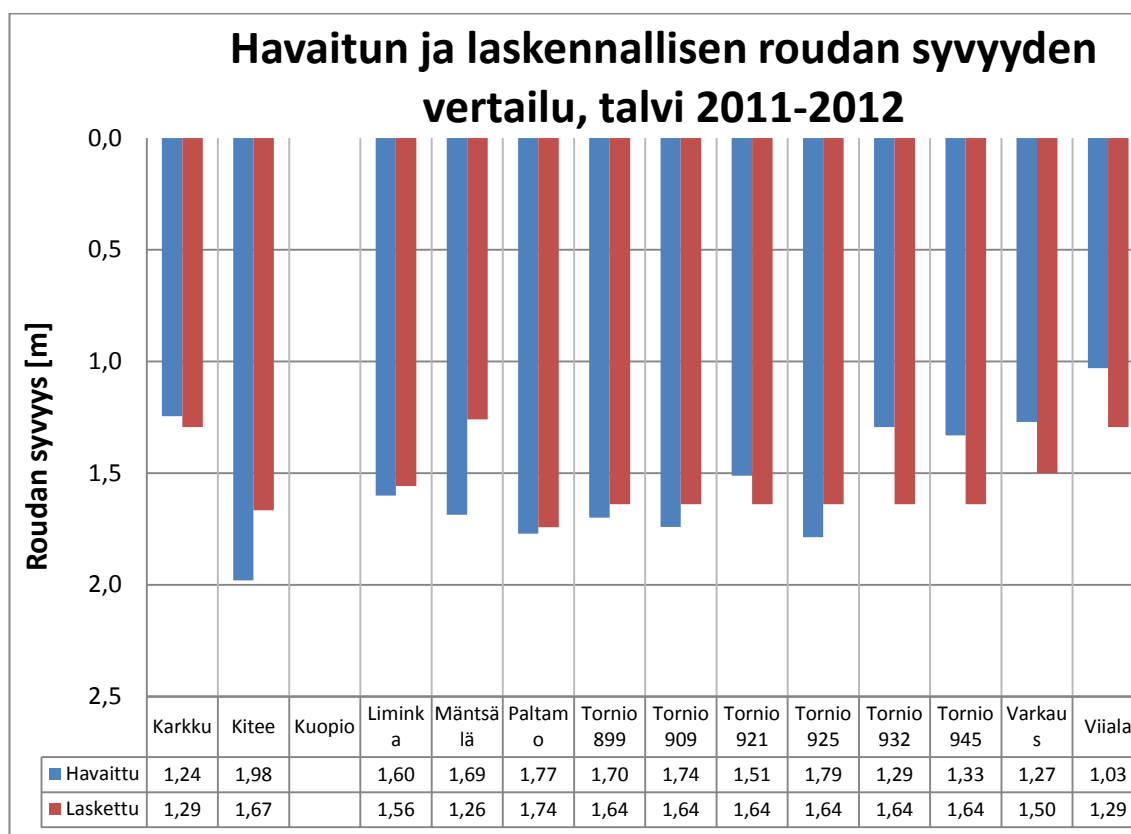
Kuva 6.7. Roudan seurantakohteilla havaitun roudan syvyyden vertailu vastaavan talven pakkasmäärän perusteella laskettuun roudan syvyyteen talvella 2009–2010.

Talven 2010–2011 kuvaajassa laskennalliset roudan syvyydet ovat mitattuja roudan syvyyksiä suuremmat lukuun ottamatta Tornion 909 kohdetta. Monilla kohteilla on suuri ero mitatun ja laskennallisen roudan syvyyden välillä. Suurimmat erot ovat Kuopion, Tornio 932, Varkauden ja Viialan kohteilla, joissa ero on yli 0,5 metriä. Laskennallista roudan syvyyttä pienempi mitattu roudan syvyys johtuu todennäköisesti mahdollisen lumipeitteen eristävydestä tai ratarakenteen kosteustilasta. Viialan, Kuopion ja Limingan koekohteiden havaittua roudan syvyyttä suurempi roudan laskennallinen tunkeutumissyvyys johtuu todennäköisesti koekohteiden ratarakenteesta olevasta eristyslevystä.



Kuva 6.8. Roudan seurantakohteilla havaitun roudan syvyyden vertailu vastaavan talven pakkasmäärän perusteella laskettuun roudan syvyyteen talvella 2010–2011.

Talven 2011–2012 kuvaajassa laskennallisten ja mitattujen roudan syvyyksien välillä on suuret erot Kiteen, Mäntsälän, Tornion 932, Tornion 945 ja Viialan kohteilla. Muilla kohteilla laskennallinen roudan syvyys täsmää kohtuullisesti mitattuun roudan syvyyteen. Suuret erot selittyvät koekohteiden paikallisilla routimis- ja ilmasto-olosuhteilla. Viialan koekohteen havaittua roudan syvyyttä suurempi roudan laskennallinen tunkeutumissyvyys johtuu todennäköisesti koekohteen ratarakenteesta olevasta eristyslevystä.



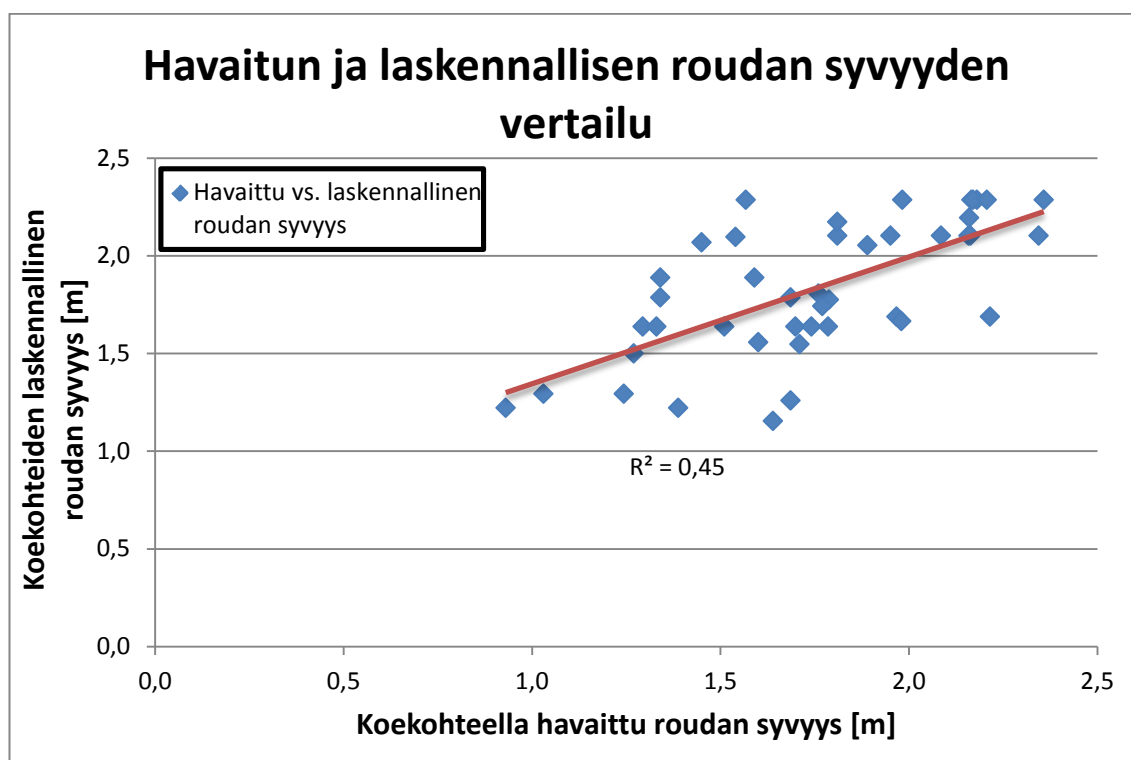
Kuva 6.9. Roudan seurantakohteilla havaitun roudan syvyyden vertailu vastaavan talven pakkasmäärän perusteella laskettuun roudan syvyyteen talvella 2011–2012.

Kuvaajista saatavan kokonaiskuvan perusteella yksinkertaisella Stefanin kaavalla saadaan hyvä oletusarvo koekohteen roudan syvyydelle. Tulokset täsmäisivät todennäköisesti paremmin, jos koekohteiden maalajikertoimet olisi määritetty tarkemmin vallitseviin routimis- ja ilmasto-olosuhteisiin. Tarkempaan roudan syvyyden määrittämiseen tarvitaan myös tietoja koekohteen ratarakenteen kosteuspiitoisuudesta ja havaintoja talvien lumen syvyyksistä. Tornion 909 kohteen mitattu roudan syvyys on ollut jokaisena talvena hieman laskennallista suurempi, mikä kertoo kohteella vallitsevien olosuhteiden mahdollistavan maalajikerrointa 0,0115 tehokkaamman routaantumisen.

Kuopion, Limingan ja Viialan kohteilla olevien routaeristeiden vaikutusta ei voi huomioida Stefanin kaavalla. Näiden koekohteiden laskennallisen ja havaitun roudan syvyyden eroista huomataan kuitenkin routaeristeen vaikutus. Kuopion ja Viialan kohteilla on havaittu jokaisena talvena selvästi laskennallista roudan syvyyttä pienempi

roudan syvyys, mikä johtuu routaeristeen roudan syvyyttä pienentävästä vaikutuksesta. Mäntsälän koekohteen havaittiin routaantuvan selvästi laskettua syvemmälle talvina 2008–2009 ja 2011–2012. Suureen eroon laskennallisen ja havaitun roudan syvyyden välillä vaikuttaa todennäköisesti Mäntsälän koekohteen kalliomurskealusrakenne.

Koekohteilla havaittuja roudan syvyyksien ja koekohteiden laskennallisten roudan syvyyksien väliselle yhteydelle saadaan kuvan 6.10 mukainen selitysaste, joka vastaa korrelaatiokertoimen arvoa 0,67. Saatu korrelaatiokertoimen arvo on kohtuullisen hyvä, joten Stefanin roudan syvyyden laskentakaavalla laskettu roudan syvyyden arvo antaa hyvän oletusarvon roudan syvyydelle.

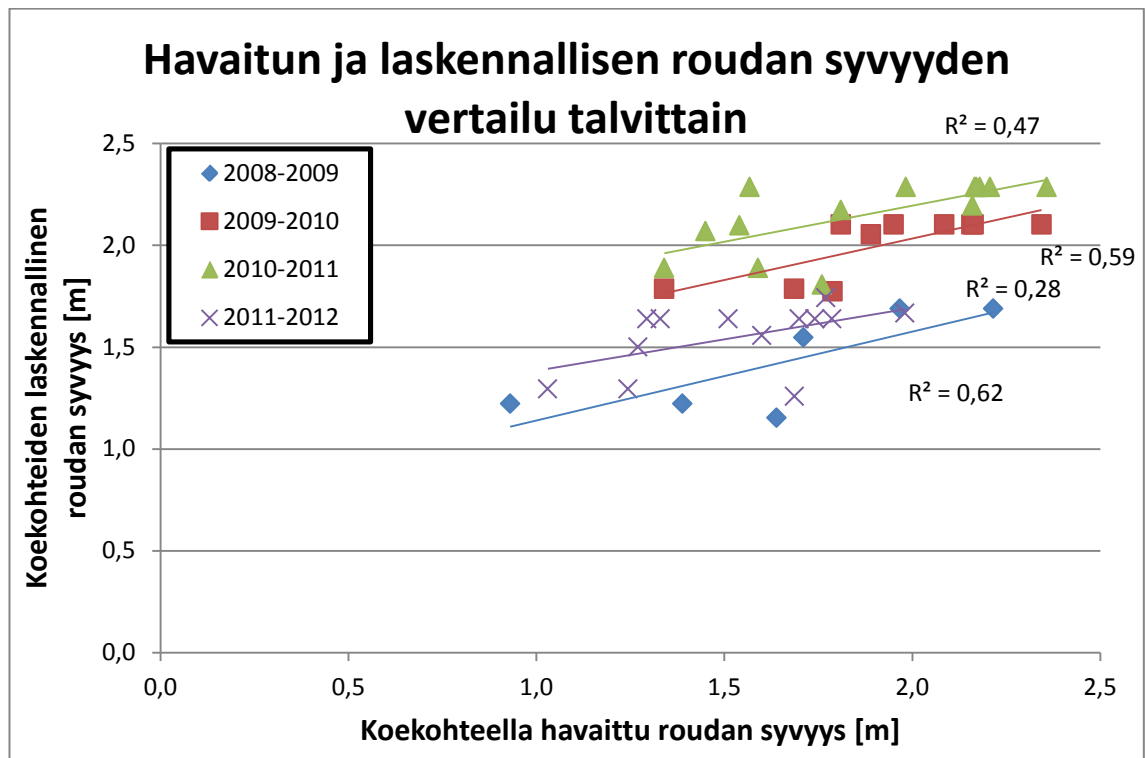


Kuva 6.10. Roudan seurantakohteella havaitun roudan syvyyden yhteys pakkasmäärän perusteella laskettuun roudan syvyyteen. Kuvaajaan on merkitty yhteyden selitysaste R^2 .

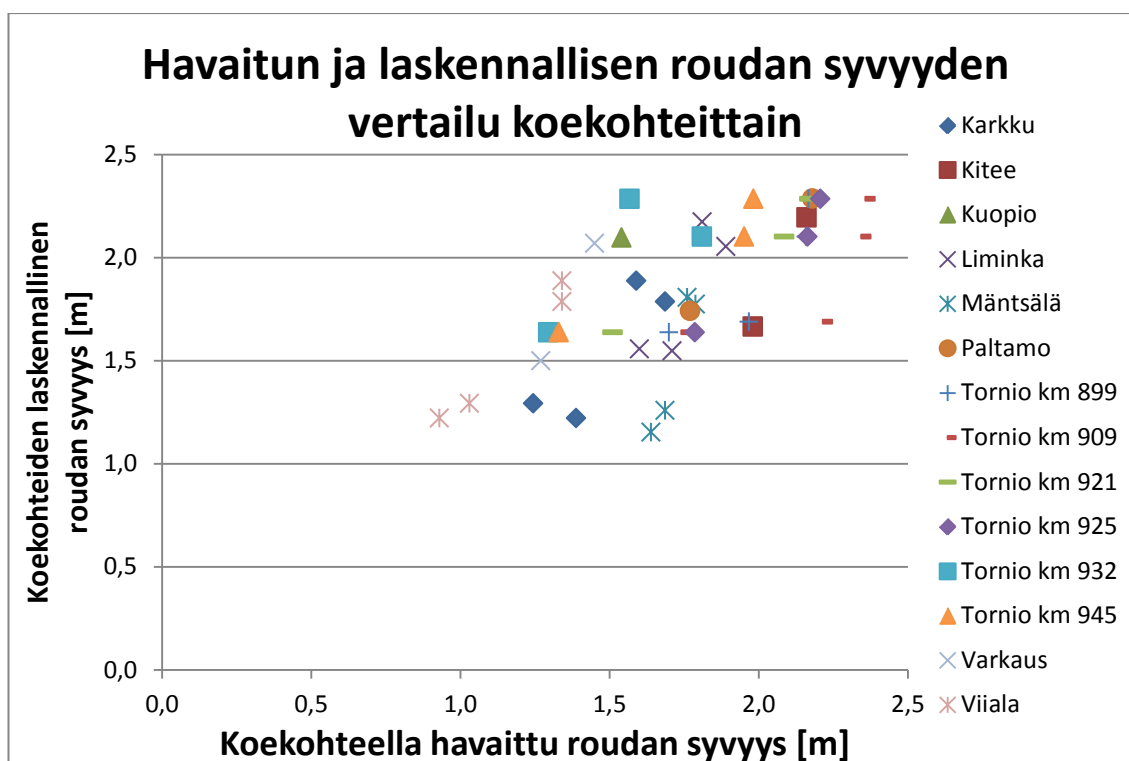
Tutkittaessa talvittain koekohteilla havaittuja roudan syvyyksiä ja Stefanin kaavalla laskettuja roudan syvyyksiä huomataan eri talvien välillä huomattavia eroja ilmiön selitysasteissa. Eri talvien trendiviivat sijoittuvat selvästi eri tasoille. Tämä tarkoittaa, että talvien välillä on selkeitä olosuhde-eroja, jotka eivät riipu pakkasmäärästä vaan talvet ovat olleet muulla tavoin routaantumiselle edullisia tai epäedullisia. Talvena 2010–2011 havaittu roudan syvyys on jäänyt selvästi pienemmäksi kuin pakkasmäärän perusteella voi laskea ja talvena 2008–2009 havaittu roudan syvyys on huomattavasti syvemmällä kuin pakkasmäärän perusteella voi laskea. Näitä eroja voivat selittää esimerkiksi lumiolosuhteet ja syyssadanta. Koekohteiden havaitut ja lasketut roudan syvyydet talvittain on esitetty kuvassa 6.11. Epävarmuutta selitysasteisiin tuo koekohteiden paikalliset ilmasto- ja routimisolosuhteet. Kuvaajan 6.11 korrelaatioihin vaikuttaa todennäköisesti myös Mäntsälän kalliomurskerakenne ja Viialan radan rakennekerrok-

sessä oleva xps-eriste. Talvien 2008–2009 ja 2009–2010 havaitun ja lasketun roudan syvyyden yhteyden selitysasteet ovat parhaimmat, korrelaatiokertoimina talvet saavat arvot 0,79 ja 0,77. Myös talven 2010–2011 korrelaatio on kohtuullinen 0,68, mutta talven 2011–2012 korrelaatiokertoimen arvoksi saadaan vain 0,53.

Koekohteilla havaittua ja pakkasmäärän perusteella laskettua roudan syvyyksiä voidaan tutkia myös koekohteittain, jolloin saadaan kuva 6.12 mukainen kuvaaja. Kuvausta havaitaan, että koekohteiden havaittu ja laskettu roudan syvyys osuvat useina talvina kuvaajan samalle alueelle.



Kuva 6.11. Roudan seurantakohteella havaitun roudan syvyyden yhteys pakkasmäärän perusteella laskettuun roudan syvyyteen talvittain tarkasteltuna. Kuvaajaan on merkitty yhteyksien selitysasteet R^2 .



Kuva 6.12. Roudan seurantakohteilla havaitun roudan syvyyden yhteys pakkasmäärän perusteella laskettuun roudan syvyyteen koekohteittain tarkasteltuna.

6.3 Havaitun ja laskennallisen routanousun vertailu

Roudan monitorointiasemilla tapahtuneiden routanousujen vertaaminen laboratorioko-keiden perusteella laskettuihin routanousuihin tapahtuu segregatiopotentialiteorian avulla. Todellisia kentällä havaittuja routanousuja verrataan segregatiopotentialiteoriaan perustuvan kaavan (5) (Nixon 1982, Konrad 1980) avulla laskettuihin routanousuihin. Routanousun laskentakaava on esitetty tarkemmin luvussa 3.4.3.

$$H_s = t \cdot SP \cdot \text{grad} T_f \quad (5)$$

Laboratoriossa tehtävien routanousukokeiden avulla on selvitetty jokaisen roudan monitorointiaseman tukikerroksen, alusrakenteen ja pohjamaan routimiskerroin, ja kenttähavaintojen perusteella on tehty havainnot jäätyneen maan lämpötilagradientista sekä roudan etenemisestä radan rakennekerroksittain. Roudan etenemiseen radan rakennekerroksesta toiseen on saatu laskemalla tuntien määrä, jonka routaraja on viipynyt jokaisessa rakennekerroksessa maan jäätymisvaiheessa. Näillä tiedoilla lasketaan edellä esitetyn kaavan 4 avulla kunkin kenttähavaintokohteen tukikerroksen, alusrakenteen ja pohjamaan teoreettinen routanousu ja saadut eri rakenneosien aiheuttamat routanousut lasketaan yhteen. Tätä laskennallista kokonaisroutanousua verrataan kenttähavainnoista saatuihin maksimiroutanousuarvoihin. Myös jokaisen kerroksen aiheuttamaa mitattua routanousua voidaan verrata erikseen sen kerroksen laskennalliseen maksimiroutanou-

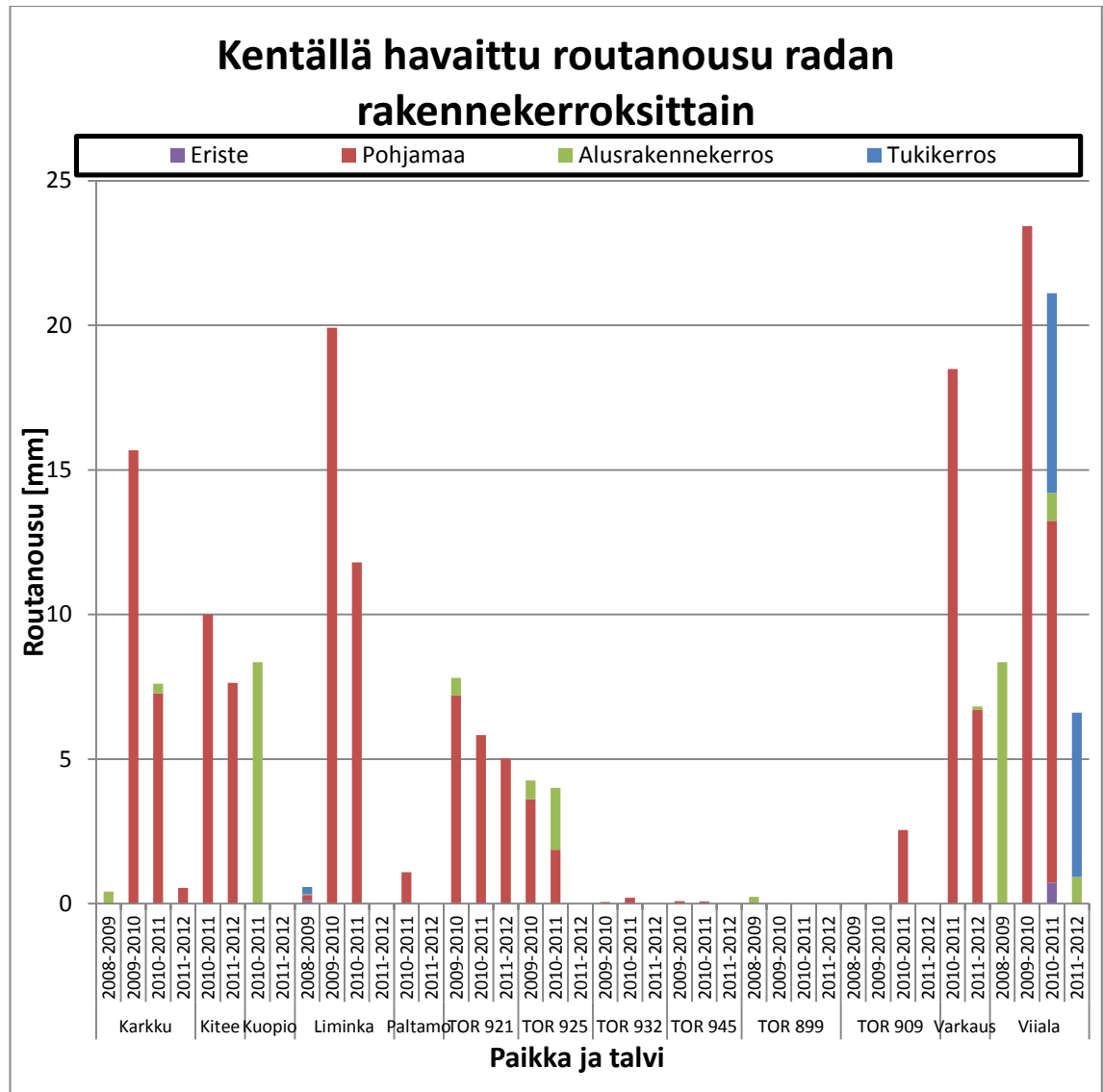
suun. Tässä laskelmissa huomioidaan kenttähavaintokohteiden mahdollinen in-situ routanousu käyttämällä kaavassa routimiskerrointa segregatiopotentialin tilalla, koska routimiskerroin huomio itsessään jäätyvän veden tilavuuden kasvun. Routanousuhavainnoissa käytetään ratapölkyn päissä tapahtuvien routanousujen keskiarvoa, koska keskiarvo antaa riittävän suuruusluokan havaitulle routanousulle ja sen vertailulle laskennallisiin routanousuihin.

Kuvaajista havaitaan laskennallisten routanousujen olevan moninkertaiset verrattuna havaittuihin routanousuihin. Tämä tarkoittaa, että routanousukokeiden perusteella koekohteella voisi tapahtua sopivissa routimis- ja ilmasto-olosuhteissa moninkertaisia routanousuja nyt havaittuihin verrattuna. Todennäköinen syy laskennallisen ja havaitun routanousun välillä on ratarakenteessa vallitsevat kosteusolosuhteet ja rajoitetut veden kulkeutumismahdollisuudet jäätymisvyöhykkeeseen. Routanousukokeessa koekappaleella on esteettömät routimisolosuhteet, mutta kentällä ei näiden havaintojen perusteella ole esteettömät routimisolosuhteet. Myös radalla vaikuttava ratarakenteen omapaino on pienentänyt havaittuja routanousuja verrattuna laskennallisiin routanousuihin.

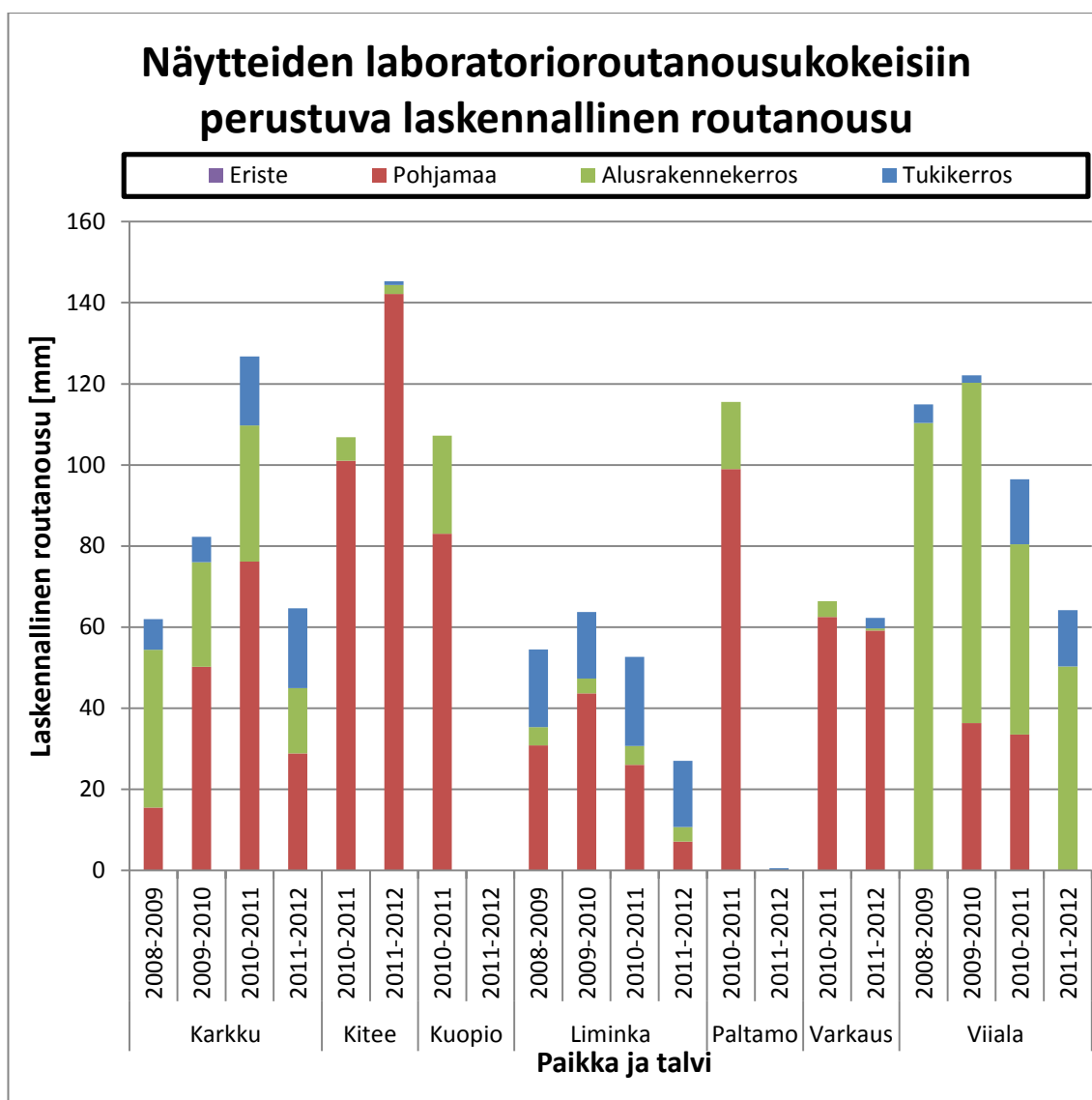
Koekohteiden laskennallisten routanousujen suuruusluokka eroaa merkittävästi havaituista routanousuista, joten laskennallisten routanousuarvojen käyttö radan suunnittelun perusteena ei toimi, mutta routanousukokeet ja niiden perusteella tehtävä laskennallisen routanousun määrittäminen kertoo routivimman rakennekerroksen.

Kentällä havaittu routanousu aiheutuu yleensä ratarakenteen alla olevasta routivasta pohjamaasta. Tämän todistavat myös kuvaajat 6.13 ja 6.14, joissa suurimman osan koekohteiden routanousuista on aiheuttanut routiva pohjamaa sekä kenttähavaintojen että laboratorioroutanousukokeisiin ja routarajan sijaintihavaintoihin perustuvien laskennallisten kenttäroutanousujen perusteella. Muutamilla koekohteilla ratarakenteen alusrakennekerros aiheuttaa suurimman osan laskennallisesta routanousuista riippuen kuitenkin talvesta. Koekohteiden havaituista routanousuista ratarakenteen alusrakennekerros aiheuttaa suurimman osan yhtenä talvena Viialassa ja Kuopiossa.

Laskennallisen routanousun määrittämiseen sisältyy virhealttius, joka johtuu ratarakenteen kerrospaksuuksien sekä routarajan sijainnin epätarkasta määrittämisestä. Epätarkkuudet voivat aiheuttaa joissakin tapauksissa virhettä routimisesta aiheuttavan kerroksen arviointiin. Suurin virhealttius on silloin, kun routiminen tapahtuu lähellä kerrosrajaa.

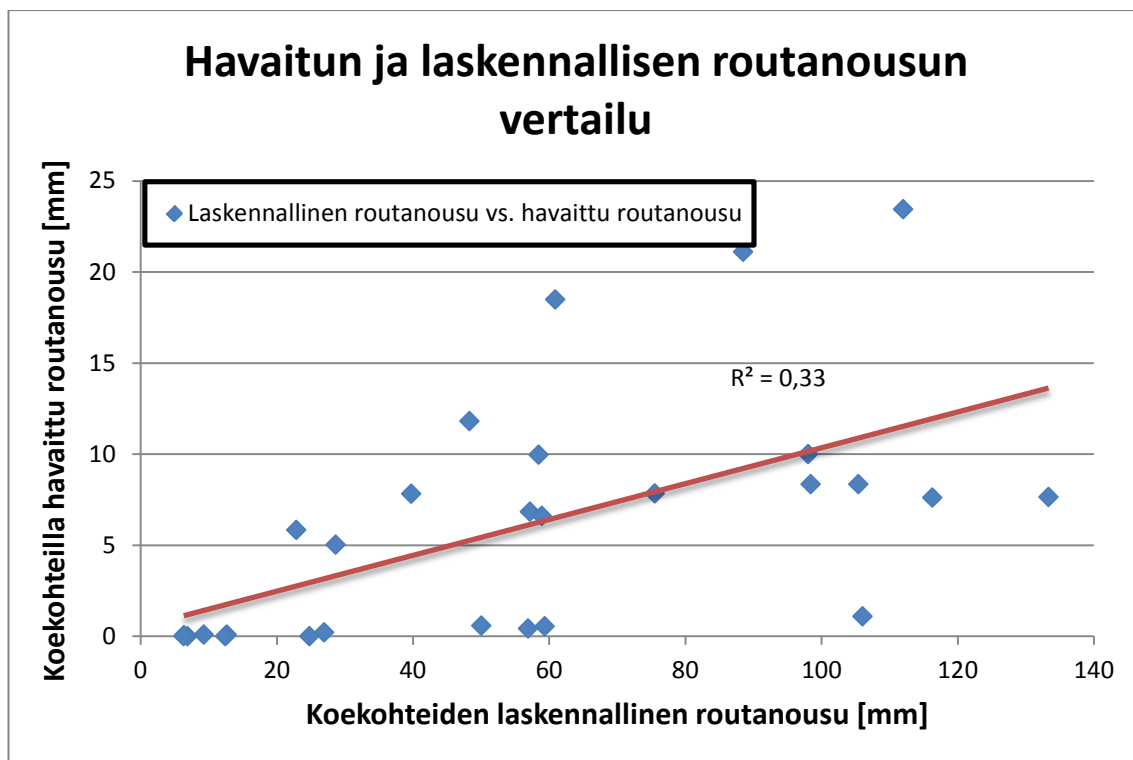


Kuva 6.13. Kenttähavaintokohteilla havaittu routanousu radan rakennekerroksittain eli kuvaajista nähdään routanousun aiheuttanut radan rakennekerros.



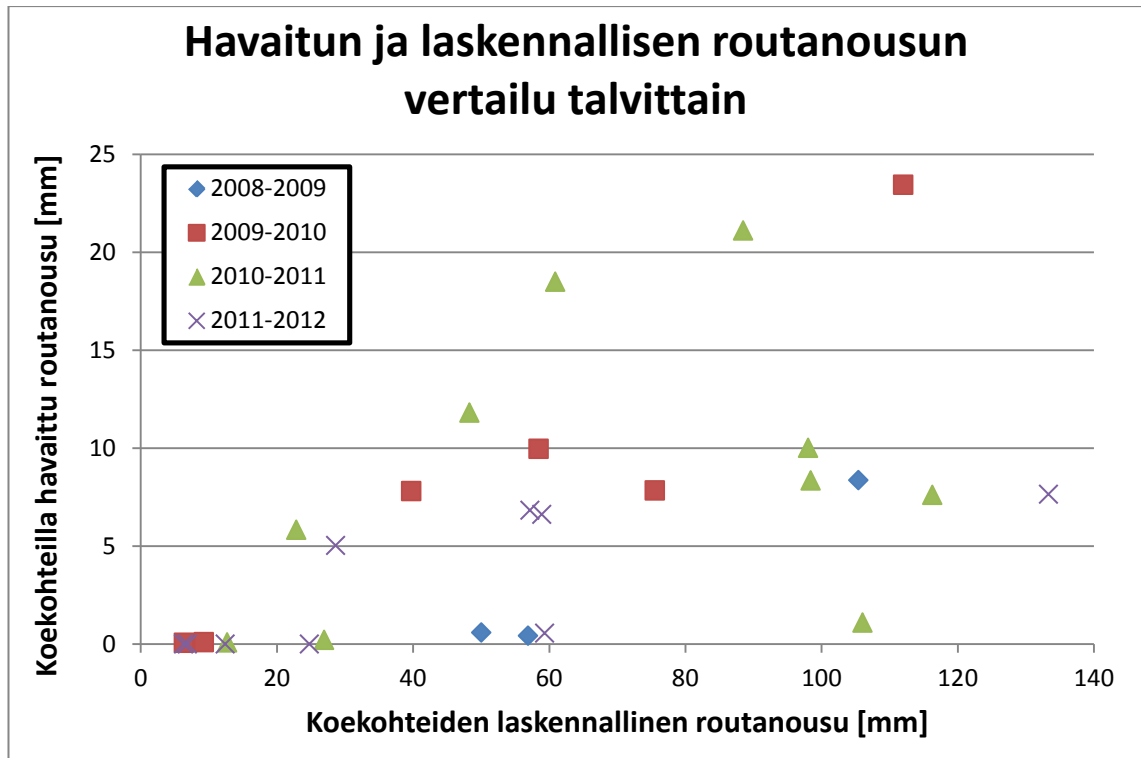
Kuva 6.14. Näytteiden laboratorioroutanousukokeisiin perustuva laskennallinen routanousu kentällä rakennekerroksittain.

Koekohteiden laskennallisen ja havaitun routanousun välille ei saada hyvää selitystasastetta eikä siten korrelaatiokerrointa. Laskennallisen ja havaitun routanousun välinen yhteys on esitetty kuvassa 6.15 ja korrelaatiokertoimeksi saatiin 0,34. Kuvaajassa on havaintopisteitä, jotka ilmentävät kentällä havaittua routanousua samalla kun, koekohteen laskennallinen routanousu on nolla tai lähes nolla. Näiden kohteiden materiaalit saivat routanousukokeissa pienet routimiskertoimen arvot. Pienet routimiskertoimet aiheuttavat pienen laskennallisen routanousun. Nämä kohteet ovat Tornio-Kolari rataosan mittauskohteita. Tornion kohteiden näytteidenoton on suorittanut urakoitsija (Hietala et al. 2010) eri näytteenottomenetelmällä kuin TTY muissa kohteissa. Tornion kohteissa pohjamaanäytteille määritetyt routimiskertoimet ovat pieniä ja vastaavat raide-sepelin routimiskertoimia, joten Tornion kohteiden näytteiden ottosyvyyden epätarkkuus voisi selittää asiaa näiltä osin.

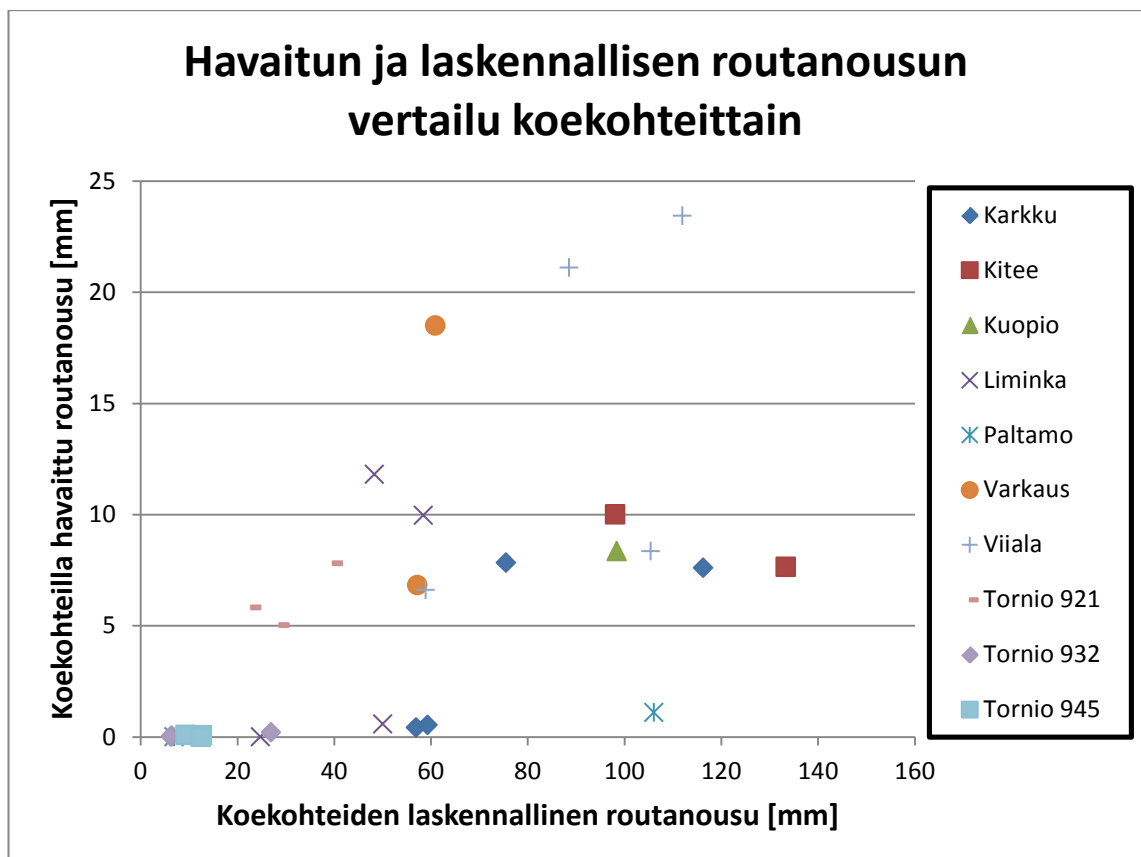


Kuva 6.15. Roudan seurantakohteella havaitun routanousun yhteys segregatiopotentialiteorian avulla laskettuun routanousuun. Kuvaajaan on merkitty yhteyden selityssaste R^2 .

Koekohteiden laskennallista ja havaittua routanousua voidaan tutkia myös talvittain, jolloin nähdään tarkemmin huonosti ja hyvin korreloivat talvet. Tämä tarkastelu on tehty kuvassa 6.16. Kuvaajan perusteella voidaan todeta, ettei laskennallisten ja havaittujen routanousujen jako vuosiin tuo esille selkeitä eroja/systematiikkaa vuosien välillä. Kuvassa 6.17 on esitetty havaittujen ja laskennallisten routanousujen vertailu koekohteittain. Myöskään laskennallisten ja havaittujen routanousujen vertailu koekohteittain ei tuo esille selkeää systematiikkaa koekohteiden välille. Havaitun ja laskennallisen routanousun vertailu talvittain ja koekohteittain antaa mahdollisuuden tutkia routimisolosuhteiden vaikutusta routanousuihin. Routanousujen tarkempi tutkimus vaatii koekohteiden ilmastotietojen ja maan kosteustietojen yhdistämistä tutkimusaineistoon ja koekohteiden tarkempaa yksittäistä tarkastelua. Routanousujen vuosittaisten erojen selittäjinä voivat olla esimerkiksi syyssateiden sademäärä, maan kosteus, pakkasmäärä, roudan etenemisnopeus tai lumikerroksen paksuus.



Kuva 6.16. Roudan seurantakohteella havaitun routanousun yhteys segregaatiopotentiaaliteorian avulla laskettuun routanousuun talvittain tarkasteltuna.



Kuva 6.17. Roudan seurantakohteella havaitun routanousun yhteys segregaatiopotentiaaliteorian avulla laskettuun routanousuun koekohteittain tarkasteltuna.

Laskennallisen routanousun määrittämiseen liittyvät epävarmuudet aiheuttavat epävarmuutta havaitun ja laskennallisen routanousun vertailuun. Laskennallisen routanousun määrittämiseen aiheuttavat epätarkkuutta roudan syvyyden määrittäminen, lämpötilagradientin määrittäminen ja routimiskertoimen määrittäminen. Roudan syvyyden määrittämisestä aiheutuu epätarkkuutta, jos roudan etenemistä tukikerroksesta alusrakenteeseen ja mahdollisesti pohjamaahan ei tunneta tarkasti. Erityisesti roudan eteneminen maan kerrosrajoilla aiheuttaa epätarkkuutta arvioitaessa aikaa, jonka routa viipyy tuki-, alusrakenteen kerroksessa tai pohjamaassa. Erityisen tärkeää on määrittää tarkasti aika, jonka routa kuluttaa pohjamaahan, koska pohjamaan suuri routimiskerroin aiheuttaa yleensä merkittävimmät routanousut ratarakenteessa. Lämpötilagradientin määrittäminen kenttämittausten perusteella tuo pientä epätarkkuutta laskennallisen routanousun määrittämiseen, koska laskennassa käytetään maakerrosten keskimääräistä lämpötilagradientin arvoa ajanjaksolta, jonka routa on kyseisessä maan kerroksessa. Routimiskertoimen määrittäminen aiheuttaa epätarkkuutta laskennallisen routanousun määrittämiseen, koska routimiskertoimen määrittäminen routanousukokeen tulokuvasta on epätarkkaa.

7 PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSSUOSITUKSET

7.1 Radan rakennekerrosten routaantuminen ja routiminen

Radan rakennekerroksien routaantumista ja routimista tutkittiin talvikausina 2008–2012 yhteensä 14 roudan seurantakohteilla, jotka sijaitsevat eri puolilla rataverkkoa. Koekohteet oli valittu pääosin sellaisista rataverkon paikoista, joilla tiedettiin olevan routaongelmia. Talvet 2009–2010 ja 2010–2011 olivat monilla seurantakohteilla ankarimmat mittauksena talvet ja silloin havaittiin merkittävimmät routanousut. Suurin osa seurantakohteista routaantui tuki- ja alusrakennekerroksia syvemmälle pohjamaahan, mikä aiheutti usein routanousuja. Routivimmat koekohteet olivat Karkku, Kitee, Liminka, Varkaus ja Viiala. Näillä kohteilla tapahtui kylminä talvina noin 20 mm routanousuja. Syvimmälle routa tunkeutui Tornion routaseurantakohteilla, missä ankarimpana havainnointitalvina routa ulottui yli 2,3 metriin. Tornion kohteiden routanousut jäivät kuitenkin pieniksi lukuun ottamatta kohdetta Tornio 921, jossa havaittiin useina talvina noin 10 mm routanousuja.

Roudan syvyys riippui merkittävästi talven pakkasmäärästä. Seurantakohteissa laskettiin ankarimmillaan Ilmatieteen laitoksen säähavaintojen perusteella noin 40000 Kh pakkasmäärä Tornion kohteille talvella 2010–2011 ja leudoin pakkasmäärä 10000 Kh havaittiin Mäntsälässä talvella 2008–2009. Pakkasmäärän ohella muita roudan syvyyteen vaikuttavia merkittävimpiä tekijöitä ovat lämpöä eristävän lumikerroksen paksuus sekä ratarakenteen kosteus. Syyssadannan suuruus vaikuttaa ratarakenteen vesipitoisuuteen ja suuri vesipitoisuus edistää ratarakenteen routimista, mutta toisaalta hidastaa roudan tunkeutumista.

Roudan seurantakohteiden havainnoilla pystyi paikantamaan routivan kerroksen, jos sellainen oli olemassa. Usein kohteiden routiminen johtui pohjamaasta, mikä tarkoittaa liian vähäistä rakennekerrospaksuutta, koska vanhoja olemassa olevia ratarakenteita ei ole mitoitettu routimattomiksi. Karkun, Tornio 921, Varkauden ja Viialan kohteilla havaittiin myös alusrakennekerrosten aiheuttamaa routimista, joka johtuu routivasta materiaalista. Alusrakenteen routimista voitaisiin todennäköisesti vähentää kuivatusta tehostamalla. Viialan koekohteella tuki- ja alusrakennekerroksen rajalla tapahtui routimista. Viialan koekohteella havaittu ratarakennekerrosten routiva materiaali voi johtua tukikerrosmateriaalin hienontumisesta.

Kiteen ja Kuopion roudan seurantakohteilla havaittiin ratapölkyn päiden välillä epätasaista routanousua, mikä aiheuttaa raidegeometrian kierousvirhettä. Kiteellä ratapölkyn päiden välisen routanousujen ero oli jopa noin 12 mm.

Roudan seurantakohteilla, joilla oli ratarakenteen vesipitoisuutta mittaavia antureita, havaittiin merkittävää ratarakenteen vesipitoisuuden kasvua keväisin roudan sulassa. Vesipitoisuuden kasvu altistaa radan sulamispehmenemiselle, kantavuuden menetykselle ja siten ratarakenteen vaurioille. Kun ratarakenne on täysin sulanut, se kuivuu nopeasti. Sulamisen ollessa kesken jäässä oleva ratarakenne estää vettä poistumasta yläpuolisesta ratarakenteesta.

Tuloksien perusteella ratarakenteissa on paljon routimisherkkää materiaalia, jos routimiskriteerinä käyttää käytännöllisen routimattomuuden rajaa (Nurmikolu, 2006). Routivuuden luokittelussa on käytössä myös muita routivuusluokitteluja. Routivuutta testaavia routanousukokeita on myös monia, mikä estää eri menetelmillä tehtyjen routivuuskokeiden tulosten suoran vertailun. Koekohteiden näyttemateriaaleista määritettiin myös rakeisuus, jonka avulla tutkittiin näytteiden hienoainespitoisuuksien vaikutusta routivuuteen. Radan tuki- ja alusrakennekerrosten hienoainespitoisuus korreloi hyvin routanousukokeissa tapahtuneiden yhden ja neljän vuorokauden jälkeisten routanousujen kanssa, mutta routimiskerroin korreloi huomattavasti huonommin johtuen etenkin sen määrittämisen epätarkkuudesta. Pohjamaanäytteiden hienoainespitoisuus korreloi routivuuteen nähteen käänteisesti verrattuna tuki- ja alusrakennekerrosten korrelaatioihin, koska paljon hienoainesta sisältävät savimaalajit routivat vähän savilajitetta sisältäviä hienorakeisia maalajeja vähemmän.

7.2 Roudan syvyyden ja routimisen mallintaminen

Radasta otetuille näytteille laboratoriossa määritettyjen routimisherkkyyksien avulla lasketut koekohteiden laskennalliset routanousut perustuvat routimiselle esteettömiin routimis- ja ilmasto-olosuhteisiin. Todellisuudessa kentällä routimista rajoittaa merkittävästi ratarakenteen tehokas kuivatus, joka jättää todelliset routanousuhavainnot murtoosaan laskennallisista routanousuarvoista. Routanousukokeessa tutkittava materiaalien routiminen perustuu materiaalien maalajiominaisuuksiin, kun kentällä havaintoihin vaikuttaa myös vallitsevat routimis- ja ilmasto-olosuhteet. Routanousukokeessa routimattomaksi todettu materiaali ei roudi myöskään kenttäolosuhteissa, mutta routanousukokeissa routivaksi havaittu materiaali routii myös kentällä vain, jos siellä vallitsee routimiselle otolliset olosuhteet eli vettä on saatavilla ja lämpötila on pakkasella.

Tutkimuksessa roudan syvyyttä mallinnettiin pakkasmäärän neliöjuuren perustuvalla Stefanin kaavalla. Laskennalliset roudan syvyydet määritettiin erikseen jokaisen talven pakkasmäärien mukaan. Laskennallista roudan syvyyttä verrattiin todellisiin kentältä havaittuihin routanousuihin. Laskennalliset ja todetut roudan syvyydet vastasivat kohtuullisen hyvin toisiaan. Jos halutaan arvioida Stefanin kaavaan pohjautuen roudan syvyyttä tarkemmin, niin koekohteille pitäisi määrittää oikea maalajikerroin, joka riippuu kohteen maalajin vesipitoisuudesta. Ennen muuta roudan syvyyden tarkempi las-

kennallinen määritys vaatisi lämpöä eristävän lumikerroksen tarkemman huomioinnin. Stefanin kaava antaa kuitenkin yksinkertaisella laskutoimituksella hyvän likiarvon roudan syvyydestä.

Tutkimustulosten perusteella routanousujen suuruusluokan mallintaminen vaatii nyt esitettyjä enemmän selittäviä tekijöitä kohteella vallitsevista routimis- ja ilmasto-olosuhteista. Kentällä havaitun routanousun selittäminen laboratoriokokeissa havaitun routimisherkkyyden perusteella vaatii vielä jatkotutkimusta, jotta laskennallista mallia voitaisiin hyödyntää ratarakenteiden korjaussuunnittelussa. Laskennallisesti määritetty routanousu oli tarkastelukohteissa moninkertainen havaittuun routanousuun verrattuna. Suuri ero johtuu routanousukokeessa vallitsevista esteettömistä routimisolosuhteista. Kentällä routimista rajoittaa erityisesti ratarakenteen tehokas kuivatus, jolloin jäätymisvyöhykkeen jäälinssiin ei kulkeudu routimisen edellyttämää vesimäärää. Toinen syy on ero lämpötilagradientin arvossa, vaikka segregaatipotentiaaliin perustuva laskenta sitä huomioikin. Routanousukokeessa gradientin arvo on noin $25\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ ja kentällä havaittu lämpötilagradientti vaihtelee rakennekerroksittain noin välillä $1\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C/m}$. Suuremmat lämpötilagradientin arvot havaitaan pintaa läheltä olevista rakennekerroksista. Laskennallisen routanousun määrittämiseen tuo epävarmuutta myös roudan syvyyden määrittäksen epätarkkuus. Roudan syvyyden epätarkkuus aiheuttaa epätarkkuutta arvioitaessa aikaa, jonka routa viipyy tukikerroksessa, alusrakenteessa ja pohjamaassa. Erityisesti roudan eteneminen alusrakennekerroksesta pohjamaahan on tiedettävä tarkasti, koska pohjamaa aiheuttaa merkittävimmät routanousut. Laskennallisen routanousun määrittämisessä tarvitsisi huomioida tarkemmin määritettävän kohteen routimis- ja ilmasto-olosuhteet esimerkiksi samantapaisella korjauskertoimella kuin Stefanin kaavassa käytettävä maalajikerroin.

7.3 Jatkotutkimussuosituks

Roudan sulamisen vaikutusten tutkiminen on tärkeää routimisilmiöön liittyvän kokonaiskuvan saamiseksi. Tässä tutkimuksessa keskityttiin ainoastaan radan routaantumisen ja routimisen aiheuttamiin routanousuihin. Vastaava tutkimus tulee tehdä radan rakennekerrosten sulamispehmenemisestä ja -painumisesta, jolloin routimisilmiöstä saadaan laajempi kokonaiskuva koko talvijaksolta ja routailmiön koko ajalta. Keväällä tapahtuva roudan sulamisesta aiheutuva ratarakenteen mahdollinen sulamispehmeneminen ja kantavuuden aleneminen vaatii tutkimuksia ratarakenteelle aiheutuvista haitoista ja vaurioherkkyydestä.

Suomen rautatieverkko on paikoitellen jo ikääntynyttä ja vaatii lisääntyvässä määrin kunnossapitotoimenpiteitä, joten kohteet täytyy laittaa tärkeysjärjestykseen. Korjaustoimenpiteiden optimoinnin kannalta radan routimisilmiön ymmärtäminen on tärkeää, jotta ratarakenteen vauriot voidaan minimoida. Routahaitat voidaan estää estämällä ratarakenteen routiminen. Jatkotutkimusta vaatii radan routiminen pistemäistä havainnointikohtaa pidemmällä matkalla. Routimisen aiheuttamien epätasaisuuksien

hallinta ja pitkän aikavälin muutokset raidegeometriassa vaativat myös jatkotutkimuksia.

Routanousujen mallintaminen vaatii lisätutkimuksia, koska kentällä tapahtuvassa routimisilmiössä on tavanomaisia laboratoriokokeita enemmän muuttujia. Koekohteen routimisolosuhteet eivät ole esteettömät ja vakioituneet, jolloin kentällä tapahtuvan routimisen suuruusluokan arviointi on todella vaikeaa. Laboratoriossa tehtävien routanousukokeiden perusteella voidaan todeta kuitenkin materiaalin routivuus, mutta ei mallintaa routimisen suuruusluokkaa kentällä tarkastelematta paikallisten routimis- ja ilmasto-olosuhdetekijöiden vaikutusta. Jatkotutkimuksissa on tarkasteltava kentällä vallitsevia routimis- ja ilmasto-olosuhteita kattavamman mallintamisen mahdollistamiseksi. Tärkeimpänä tekijänä on ratarakenteen kosteustilan vaikutuksen ja veden kulkeutumisen tarkastelu.

Seurantakohteissa mitattujen vesipitoisuuksien hyödyntäminen routivuustutkimuksissa vaatii jatkotutkimuksia. Laboratoriokoetulosten ja kentällä vallitsevien olosuhteiden välille täytyisi kehittää routimisolosuhteita kuvaava malli, joka huomioi rakennekerrosten paksuudet, painot, pohjaveden pinnan tason ja ratarakenteen kosteuden.

Routanousut ja roudan sulamisesta mahdollisesti aiheutuva ratapölkyn vajoaminen vaikuttavat radan tasaisuuteen ja raidegeometriaan, jos kiskojen välillä on epätasaiset routanousut tai -painumat. Myös raiteen pituussuunnassa tapahtuvat äkilliset routanousut tai -painumat aiheuttavat raidegeometrian vääristymiä. Tällä hetkellä roudan monitorointiasemien havainnot kuvaavat vain pistemäisesti roudan syvyyttä ja routanousuja.

Laboratoriokokeiden tekeminen vaatii jatkokehittelyä ja uuden routanousukoelaitteiston rakentamista, jossa voidaan tutkia korkeampia näytekappaleita. Korkeammasta näytekappaleesta saadaan luotettavammin selville vesipitoisuuden jakautuminen näytekappaleeseen sekä vesipitoisuuden ja lisäveden saatavilla olon vaikutus routivuuteen. Jatkotutkimusta vaatii myös yhtenäisen routanousukoestandardin kehittäminen ja sen perusteella luotava routivuusluokittelu.

LÄHDELUETTELO

- Aittomäki, A. 1986. Routa maa- ja pohjarakentamisessa. RIL K66-1986. RIL, Helsinki. S. 5-22.
- Aittomäki, A., Saviharju, K. 1975. Rakennuksen perustusten lämpötekniillinen toiminta ja routasuojaus. VTT, Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, julkaisu 15, Helsinki. 105s.
- Anderson, D.M. 1989. Frost heave properties of soils. VTT Symposium 94, Frost in geotechnical engineering, Saariselkä, Finland, 13.-15.3.1989. Espoo, VTT. Vol 1, pp 105-125.
- Anderson, D.M., Tice, A.R. 1972. Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements. Highway Research Record. No 393, pp 12-18.
- Chamberlain, E. J. 1981. Comparative Evaluation of Frost-Susceptibility Tests. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 809, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 42-52.
- Cary, J. W. 1987. A New Method for Calculating Frost Heave Including Solute Effects. Water Resources Research, Vol. 23, No. 8, pp. 1620-1624.
- Cary, J. W., Mayland, H.F. 1972. Salt and Water Movement in Unsaturated Frozen Soil. Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 36, No. 4, pp. 549-555.
- Dirksen, C., Miller R. D. 1966. Closed-System Freezing of Unsaturated Soil. In Soil Science Society of America Journal of Proceedings, Vol. 30, No. 2, March-April 1966, pp. 168-173.
- Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy, Helsinki. 365s.
- Ehrola, E. 1974. Tierakenteiden lämpötiloista. On the temperature of road structures. Tie- ja maarakennustekniikan laitos. Julkaisu 22. Oulu. ss. 1-20.
- Guthrie, W.S., Zhan, H. 2002. Solute Effects on Long-Duration Frost Heave Behaviour of Limestone Aggregates. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1786, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. pp . 112-119.
- Harris, J. S. 1995. Ground Freezing in Practice. Thomas Telford Services Ltd., London, England.
- Hafeez, U. B. 1993. Factors influencing frost heaving of soils. Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. Ss. 14-78.
- Hietala, P., Luomala, H., Nurmikolu, A. 2010. Rakennekerrosmateriaalien routimisherkkyyks Tornio- Kolari-rataosalla; Laboratoriotutkimukset kesän 2009 näytteille ja

roudan monitorointikohteiden havainnot. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteet, Tampere. 40s.

Horiguchi, H. 1985. Determination of unfrozen water content by DSC. Proceedings of the Fourth International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, 5-7 August, pp 33-38.

InfraRYL. 2010. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 1 Väylät ja alueet. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy, 2010/1.

ISSMFE (International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering). Technical Committee on Frost, TC8. 1989. Frost on Geotechnical Engineering. VTT Symposium 94, Saariselkä, Finland 13-15.3.1989. VTT, Espoo. Vol 1, pp 15-45.

Johansen, O., Frivik, P. 1980. Heat capacity and unfrozen water. The 2nd International Symposium on ground freezing. Trondheim June 24. -26.1980. Norwegian Institute of Technology. s. 438-453.

Kolisoja, P. 2007. RHK-Akatemia, opetusmateriaali

Konrad, J. M. 1984. Soil Freezing Characteristics Versus Heat Extraction Rate. DBR Paper No. 1257. In Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers Annual Winter Meeting, New Orleans, LA, December 1984.

Konrad, J-M. 1980. Frost heave mechanics. Ph.D. Thesis. Edmonton, University of Alberta. 405p. 67 app.

Kujala, K. 1994. Routanousun mallintaminen. Kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen tutkimuksia 2/1994. Tielaitos, Geokeskus, Oulu 135 s.

Kujala, K. 1991. Factors affecting frost susceptibility and Heaving pressure in soils. PhD. Thesis. ACTA Universitatis Ouluensis Series C 58. 99p., 5 app.

Kujala, K. 1990. Jäätynneen maan fysiikka ja mekaniikka. RIL 157-2 Geomekaniikka 2, luku 18. Helsinki. Ss. 288-295.

Kujala, K. 1989. Unfrozen water content of Finnish soils measured by NMR. VTT Symposium 94, Frost in geotechnical engineering, Saariselkä, Finland, 13-15.3.1989. Espoo, VTT. Vol 1, pp. 301-310.

Liikennevirasto. 2011. Rautatieliikenteen täsmällisyys 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 16/2012. Liikennevirasto, Helsinki. 54s.

Liikennevirasto, 2010. Roudan hallintaraportti. Liikennevirasto, Helsinki. 21s. 32 liites.

Luomala, H. 2010. Ratapenkereen monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. Liikennevirasto, Helsinki. 85s., 8 liites.

McGaw, R. 1972. Frost Heaving Versus Depth to Water Table. In Highway Research Record 393, Highway Research Board, National Research Council, Washington, DC. pp. 45-55.

Mitchell, J. K. 1993. Fundamentals of Soil Behavior, Second Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Nixon, J. 1982. Field Frost Heave Predictions Using the Segregation Potential Concept. Can Geotech. J. 19 ss. 526-529.

Nurmikolu, A. 2009. Rakennekerrosmateriaalien routimisherakkyys Tornio- Kolari-rataosuudella, Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteet, Tampere. 22s. 32 liites.

Nurmikolu, A. 2006. Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherakkyys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2006. Ratahallintokeskus, Helsinki. 170 s. 6 liites.

Nurmikolu, A. 2004 Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Kirjallisuusselvitys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. Ratahallintokeskus, Helsinki. 193s.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. 2002. Ratarakenteen routasuojaus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2002. Ratahallintokeskus, Helsinki. 101 s. 1 liites.

Onninen, H. 2001. Roudan syvyyden määrittäminen. Menetelmäkuvaus/TPPT 5. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo. 14s.

Panday, S., Corapcioglu, M. Y. 1991. Solute Rejection in Freezing Soils. Water Resources Research, Vol. 27, No. 1, pp. 99-108.

Peltokangas, O. 2012. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere. 189s. 12 liites.

Rahiala, J. 1988. Maabetoni ja betonipäällysteet...käytössä maailmalla sopivatko Suomeen?... Rakennusaineteollisuusyhdistys. Tie- ja vesirakennushallitus. Betoniprojekti. TVH 723867. Turku ss. 197-235.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M. 1979. Geotekniikka. Otatieto, Helsinki. 307 s.

Ratahallintokeskus. 2011. Rataverkon kuvaus 1.1.2012. Liikenneviraston väylätietoja 4/2011. Liikennevirasto, Helsinki. 70s.

Ratahallintokeskus. 2008. Ratatekniset määräykset ja ohjeet, RAMO, osa 3, Radan rakenne, Dnro 895/731/02. Ratahallintokeskus. 44s. 31 liites.

Ratahallintokeskus. 2002. Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO), osa 11, radan päällysrakenne. Helsinki. 87 s. 26 liites.

RC-infra. 2012. Näytteenotto. [WWW]. [Viitattu 20.8.2012]. Saatavissa: <http://www.rcinfra.fi/naytteenotto.html>

RIL 2012. RIL- Routasuojausohje luku 2- luonnos, RIL 261-2012

Saarelainen, S. 1990. Jäätäneen maan fysiikka ja mekaniikka. RIL 157-2, Geomekaniikka 2, Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki. Ss. 273-288.

Saarinen, M. 2008. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkyys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 7/2008. Ratahallintokeskus, Helsinki. 75s. 18 liites.

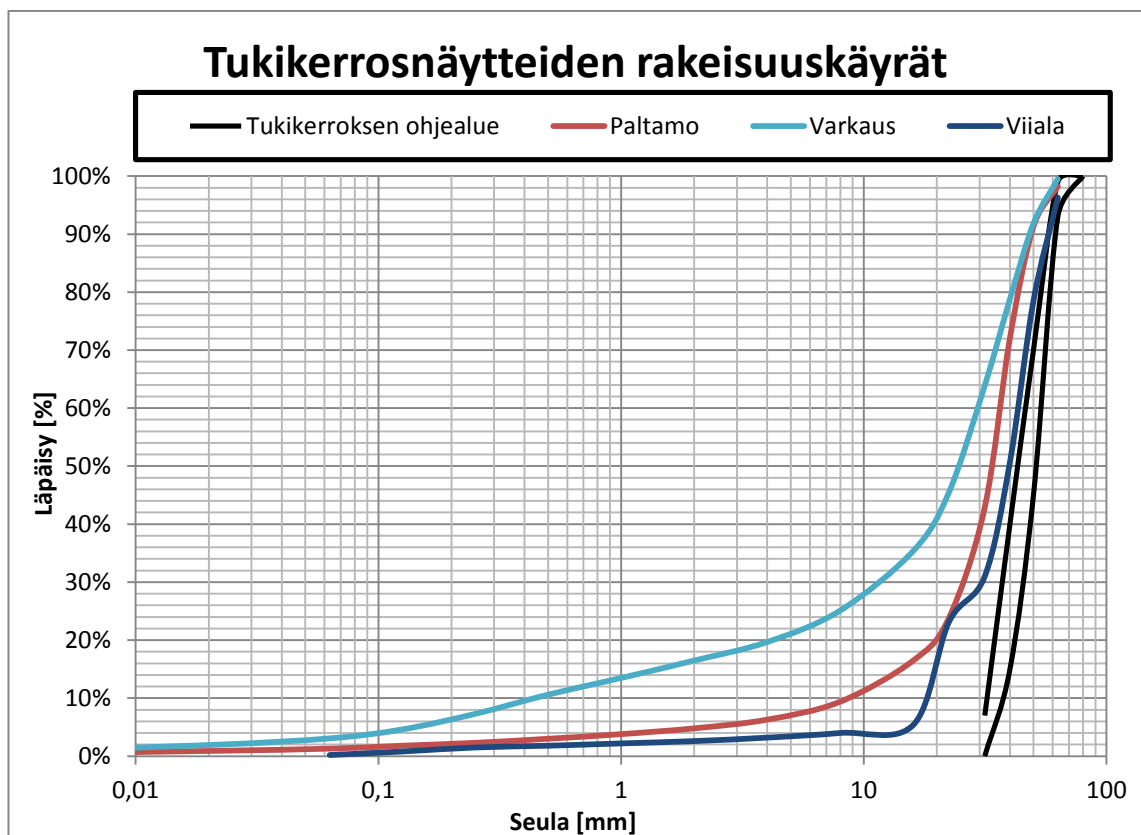
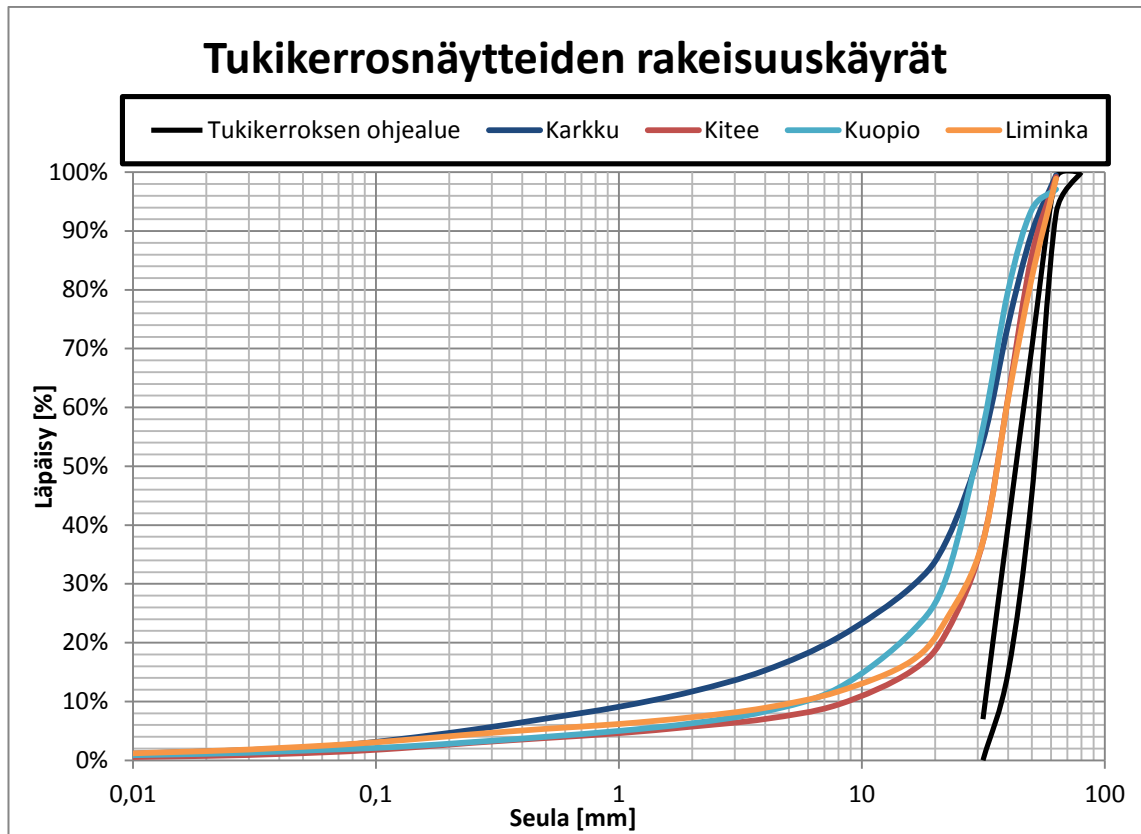
Soveri, J., Varjo, M. 1977. Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955-1975. Vesitutkimuslaitoksen julkaisuja 20. Helsinki. 66 s.

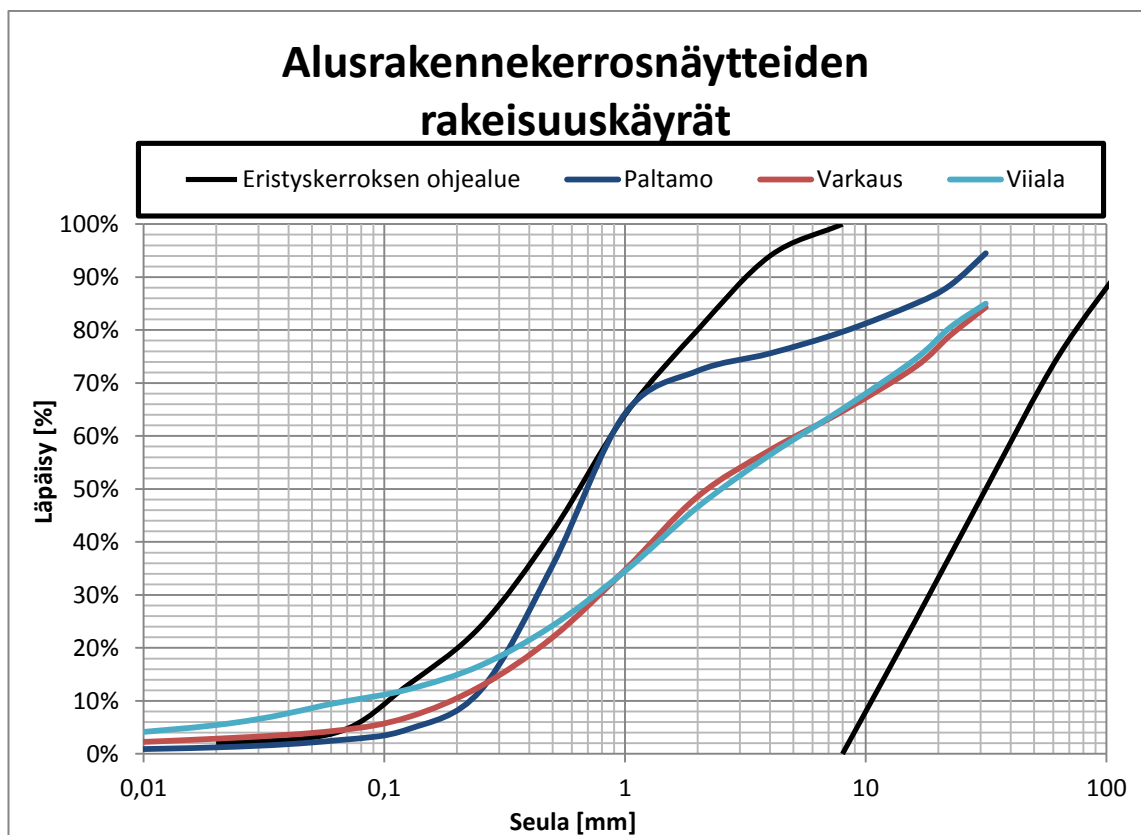
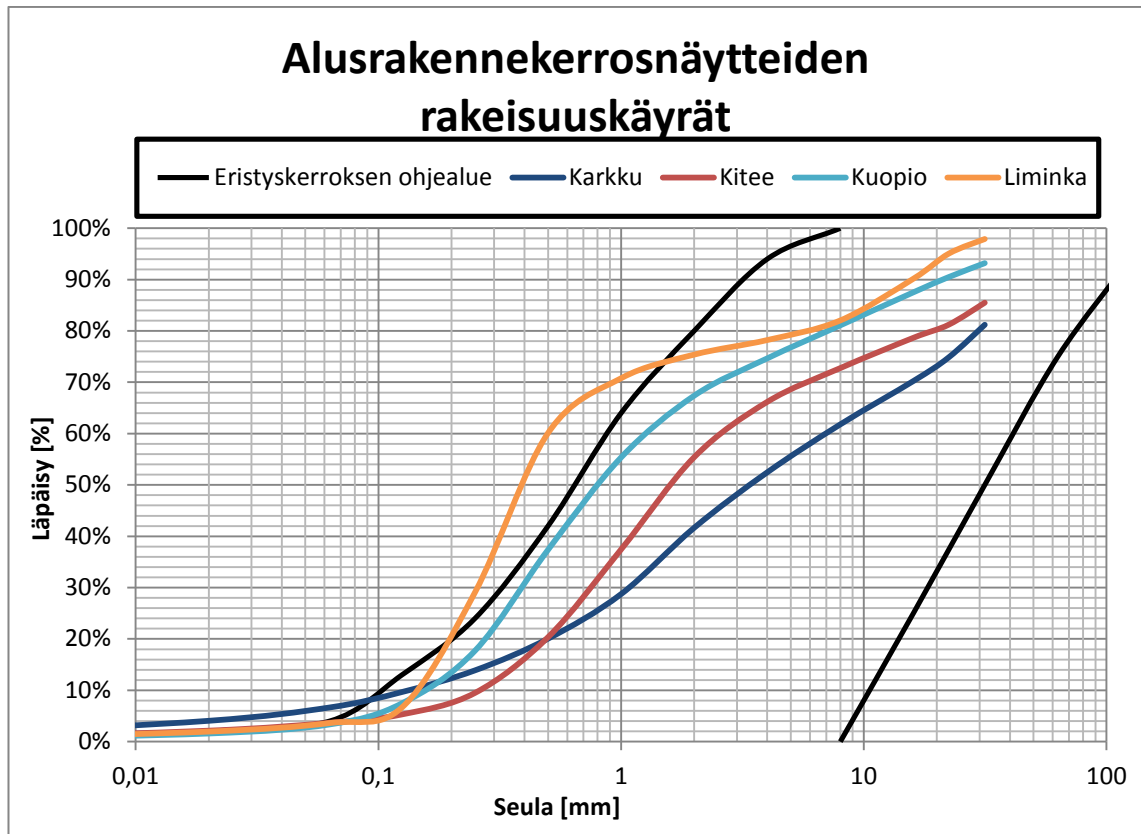
Soveri, U., Johansson, S. 1966. Havaintoja lumesta raivatun maan routaantumisesta ja sulamisesta Suomessa v. 1958-1964. VTT, julkaisu 107. Helsinki, ss. 24-26.

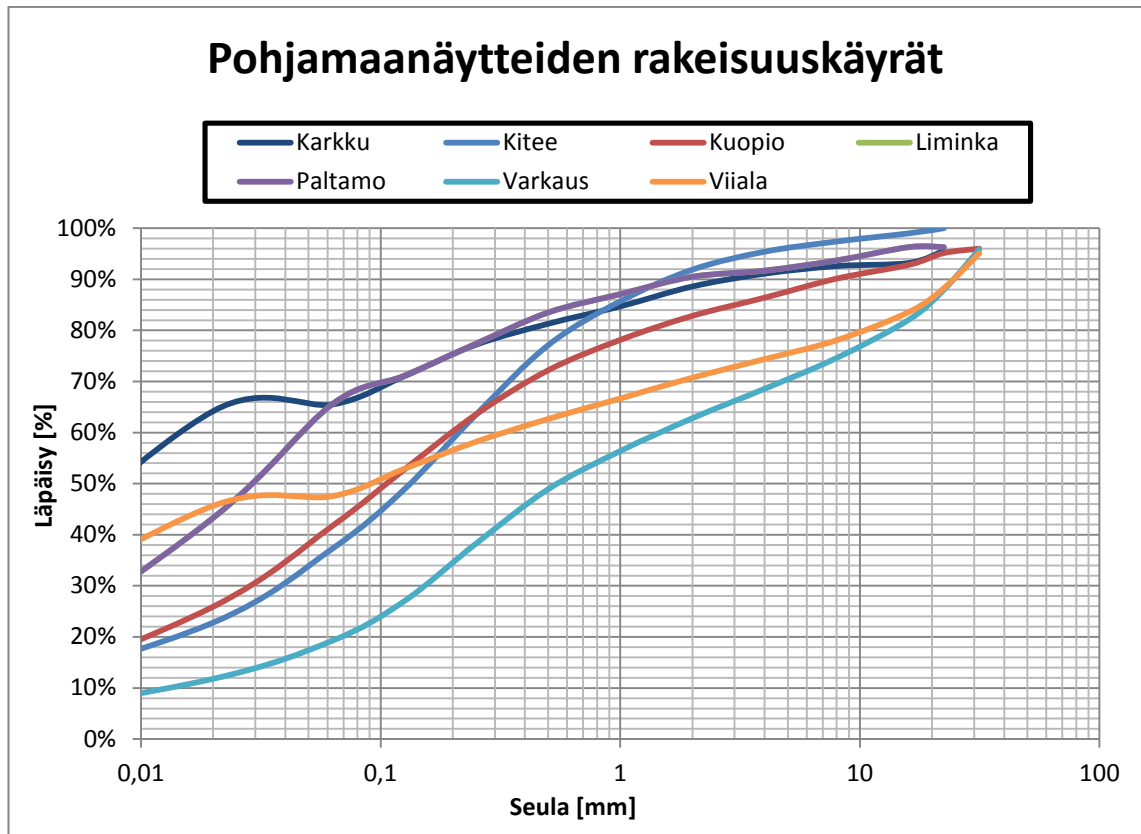
Tsytoich, N.A. 1975. The mechanics of frozen ground. Washington. 426s.

LIITTEET

- LIITE 1: Routanousukoenäytemateriaalien rakeisuuskäyrät (InfraRYL 2010)
- LIITE 2: Routanousukoenäytteiden tiedot
- LIITE 3: Routanousukokeiden tuloskuvaajat
- LIITE 4: Lämpötilaprofiilit lämpötila-/syvyys- kuvaajina jokaisen kuukauden ensimmäiseltä päivältä roudan monitorointikohteilta mitattujen talvien ajalta
- LIITE 5: Säähavaintotiedot roudan monitorointikohteilta mitattujen talvien ajalta

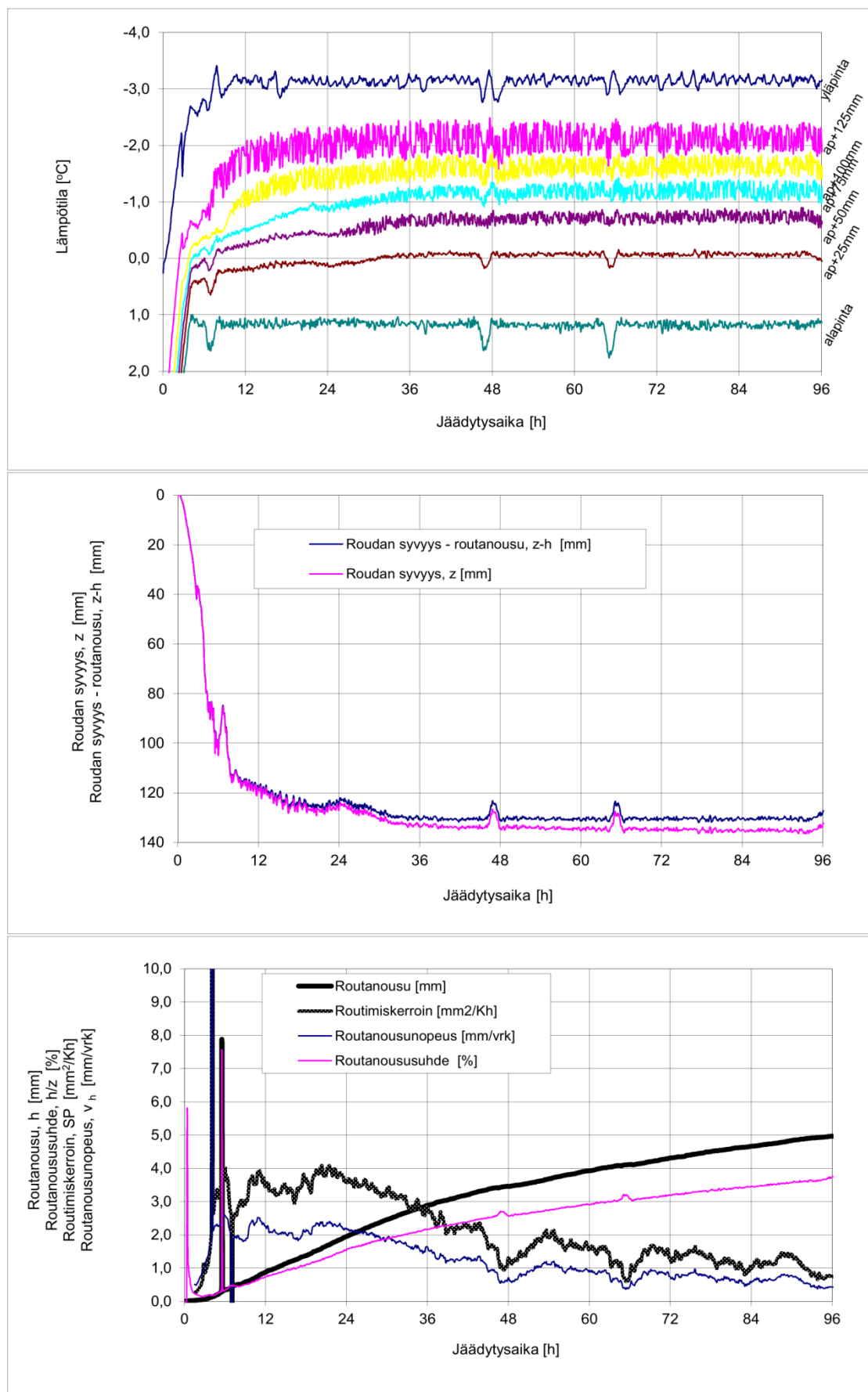




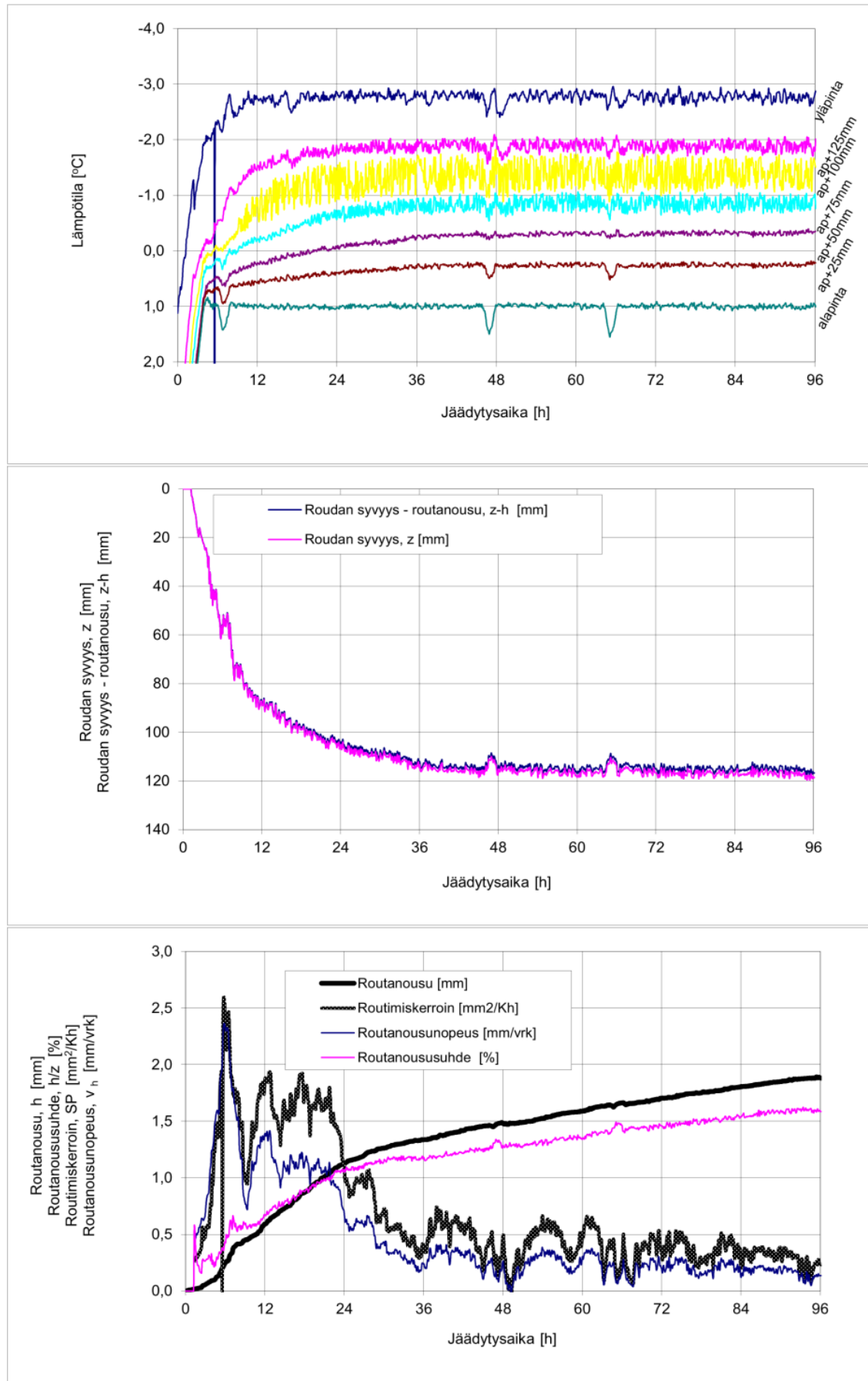


Taulukko. Routanousukoenäytteiden tietoja

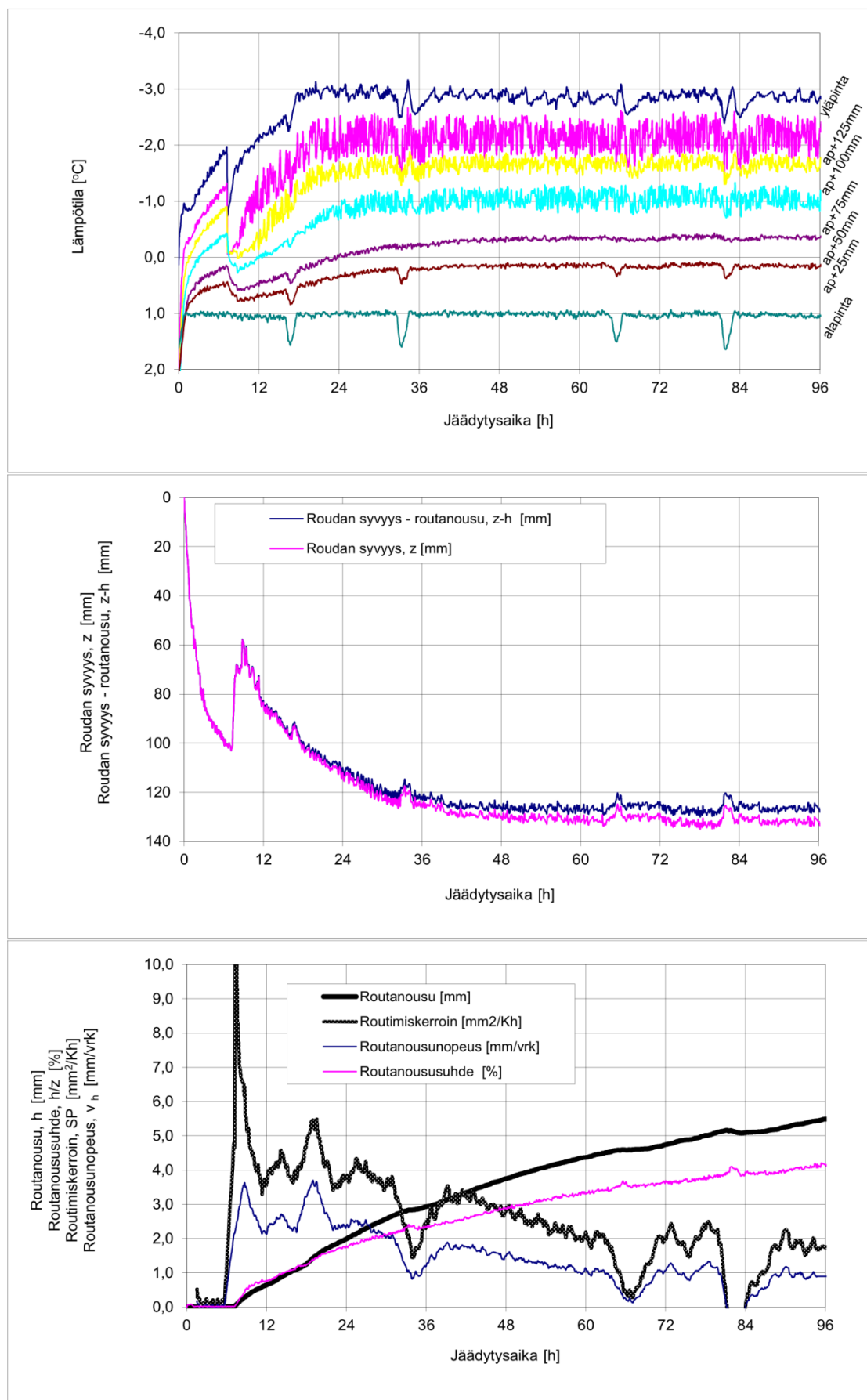
Routanousukoenäytteiden tiedot							
Materiaali	Rakennekerros	<0.063 mm (%) routakokeessa	Routakoe näytteen vesipitoisuus (%)	Routakoe näytteen korkeus (mm)	Koekappaleen paino (g)	ICT-testin kierrokset	Routakoenäytteen kuivairtoteheys (kg/m ³)
Karkku	Tukikerros	4.5	4	154	6300	50	2225
Kitee	Tukikerros	3.7	4	151.1	5800	50	2088
Kuopio	Tukikerros	5.0	4	159	6500	50	2224
Liminka	Tukikerros	6.8	4	150.4	6300	50	2280
Paltamo	Tukikerros	3.1	4	146.2	5600	50	2077
Varkaus	Tukikerros	4.8	4	144.5	6100	50	2297
Viiala	Tukikerros	4.8	4	150.9	6100	50	2200
Karkku	Alusrakenne	8.2	4	155.4	6500	50	2275
Kitee	Alusrakenne	4.3	3	156	5900	50	2079
Kuopio	Alusrakenne	3.6	4	153.6	5900	50	2089
Liminka	Alusrakenne	3.7	4	155	5700	50	2001
Paltamo	Alusrakenne	2.7	4	157.2	5700	50	1973
Varkaus	Alusrakenne	5.2	4	147.1	5900	50	2183
Viiala	Alusrakenne	11.3	4	151.6	6500	50	2334
Karkku	Pohjamaa	65.5	26.4	155.4	5700	26	1642
Kitee	Pohjamaa	37.3	10.3	155.5	6500	16	2145
Kuopio	Pohjamaa	43.5	8.8	153.2	6500	30	2206
Liminka	Pohjamaa	65.6	27.7	157.4	5945	29	1673
Paltamo	Pohjamaa	29.1	14.1	152.4	6200	18	2016
Varkaus	Pohjamaa	20.1	8.7	154.3	6500	17	2193
Viiala	Pohjamaa	50.0	19.1	155.4	6000	50	1835

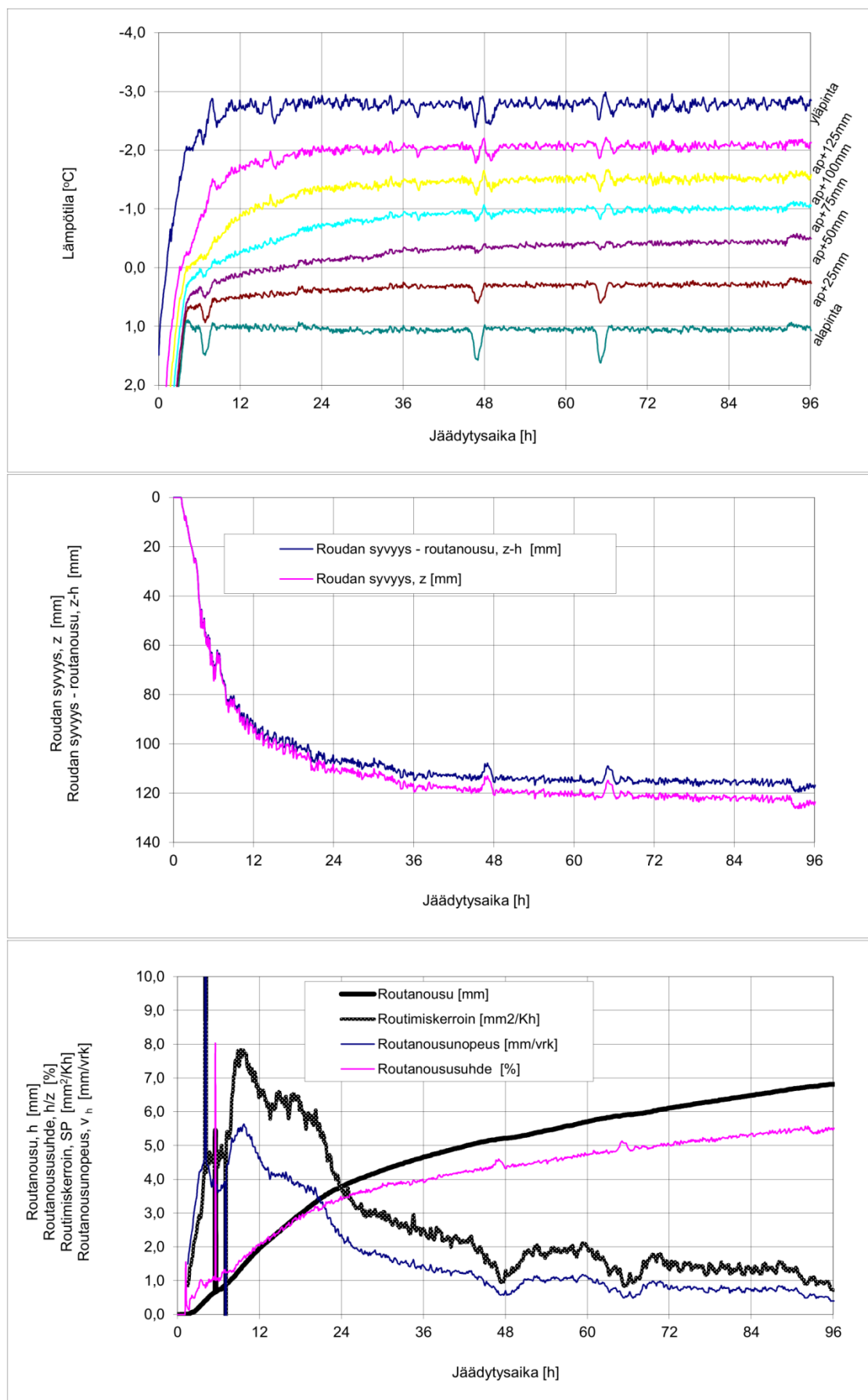


Näyte Karkku tukikerros

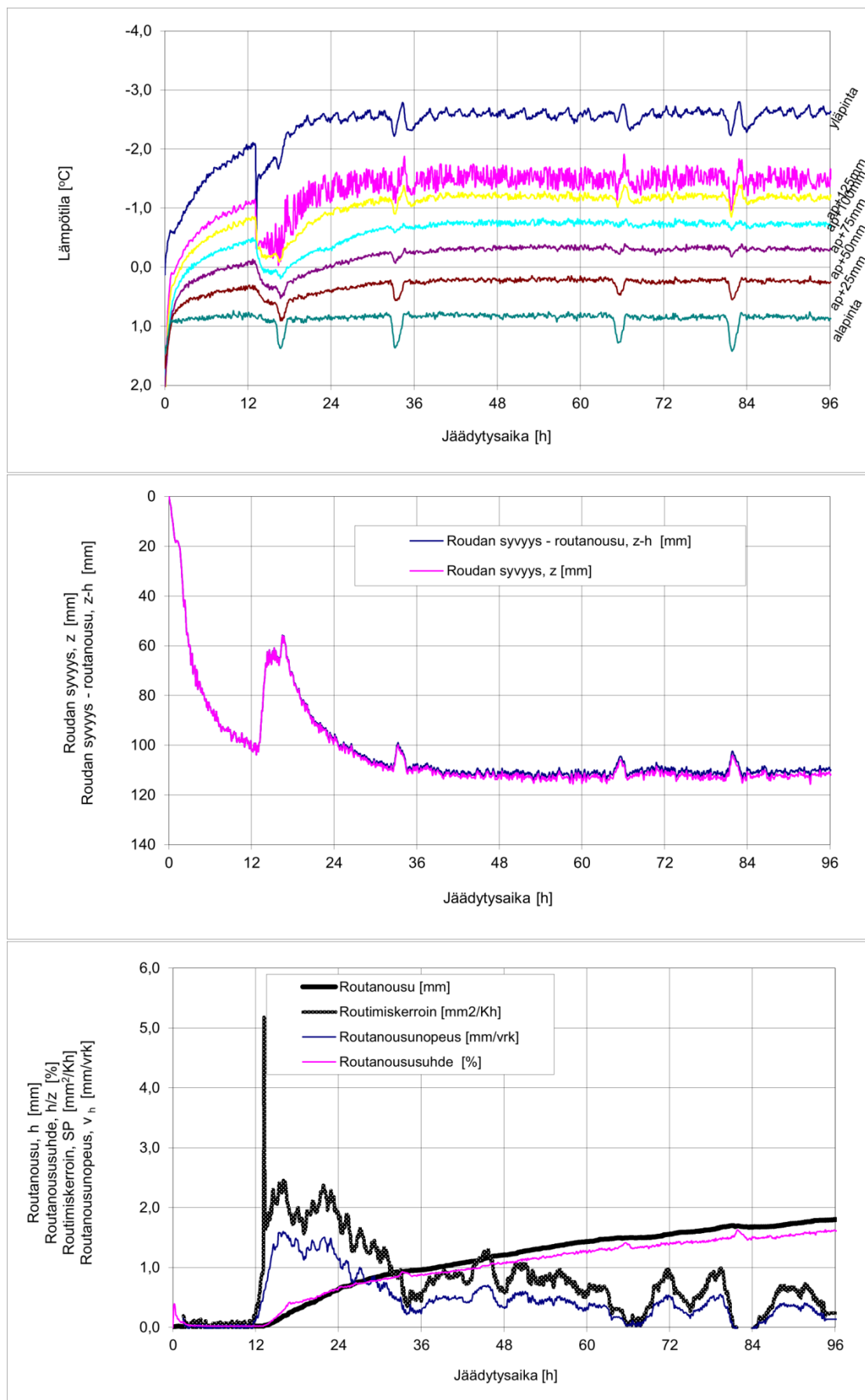


Näyte Kitee tukikerros

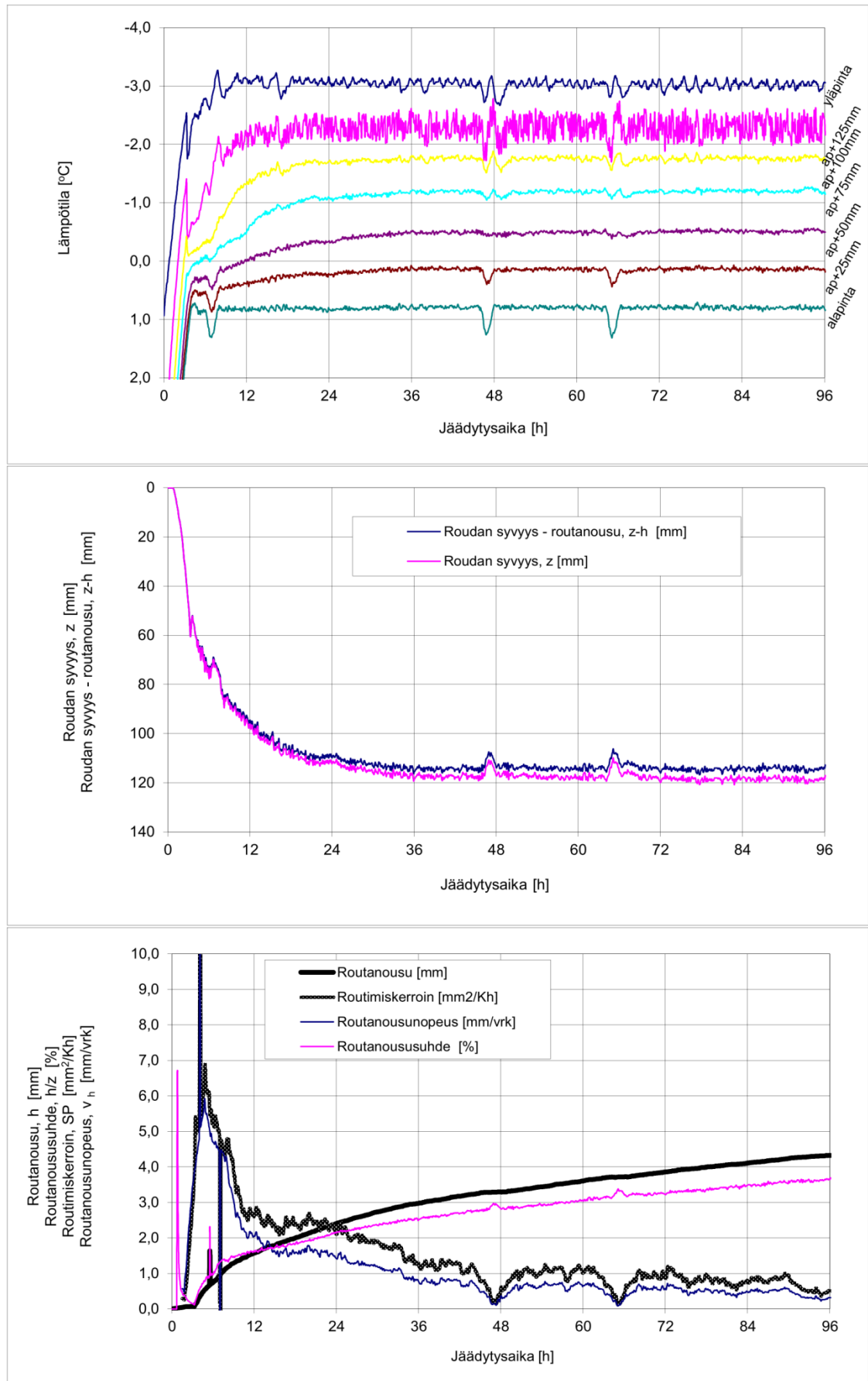




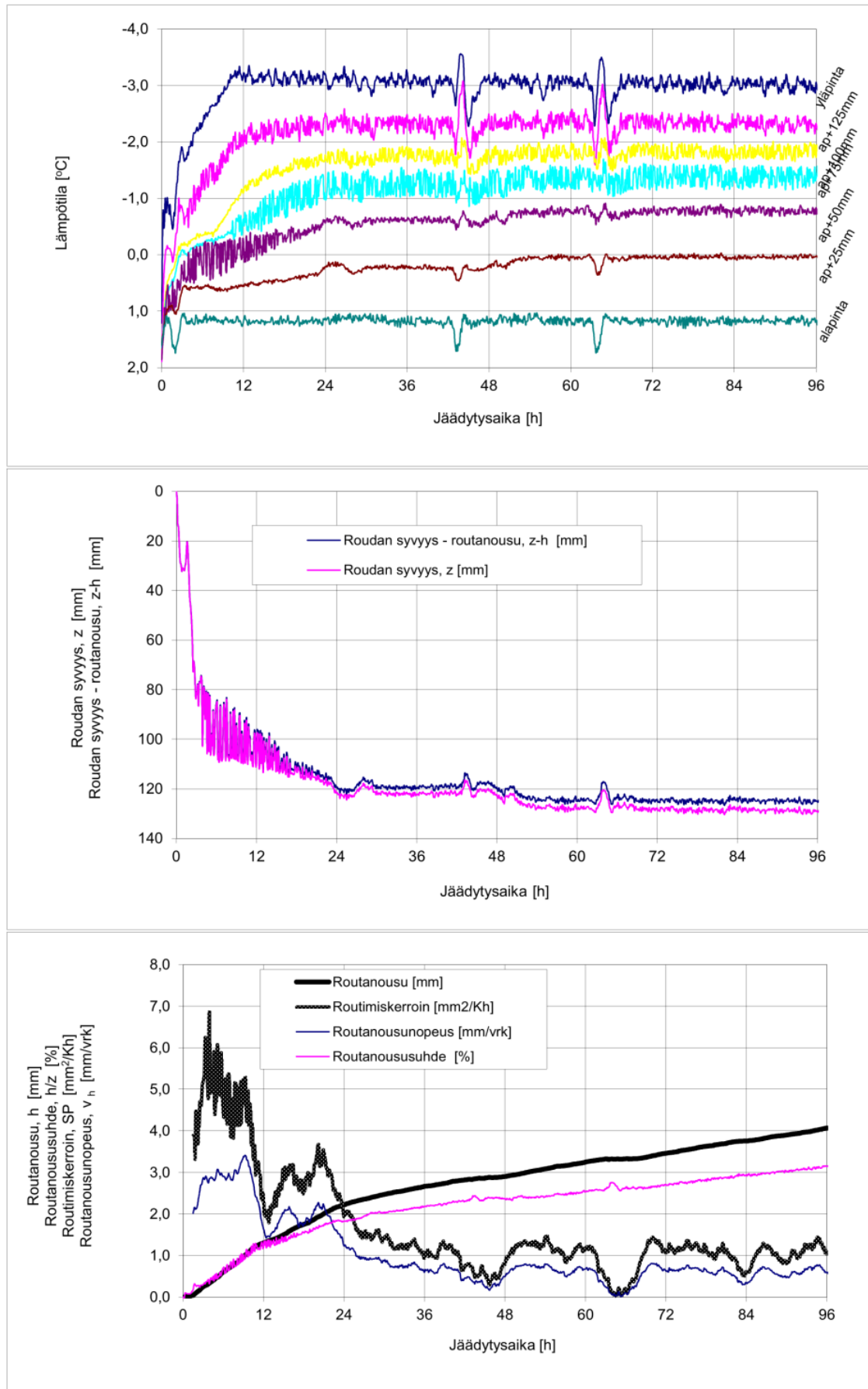
Näyte Liminka tukikerros



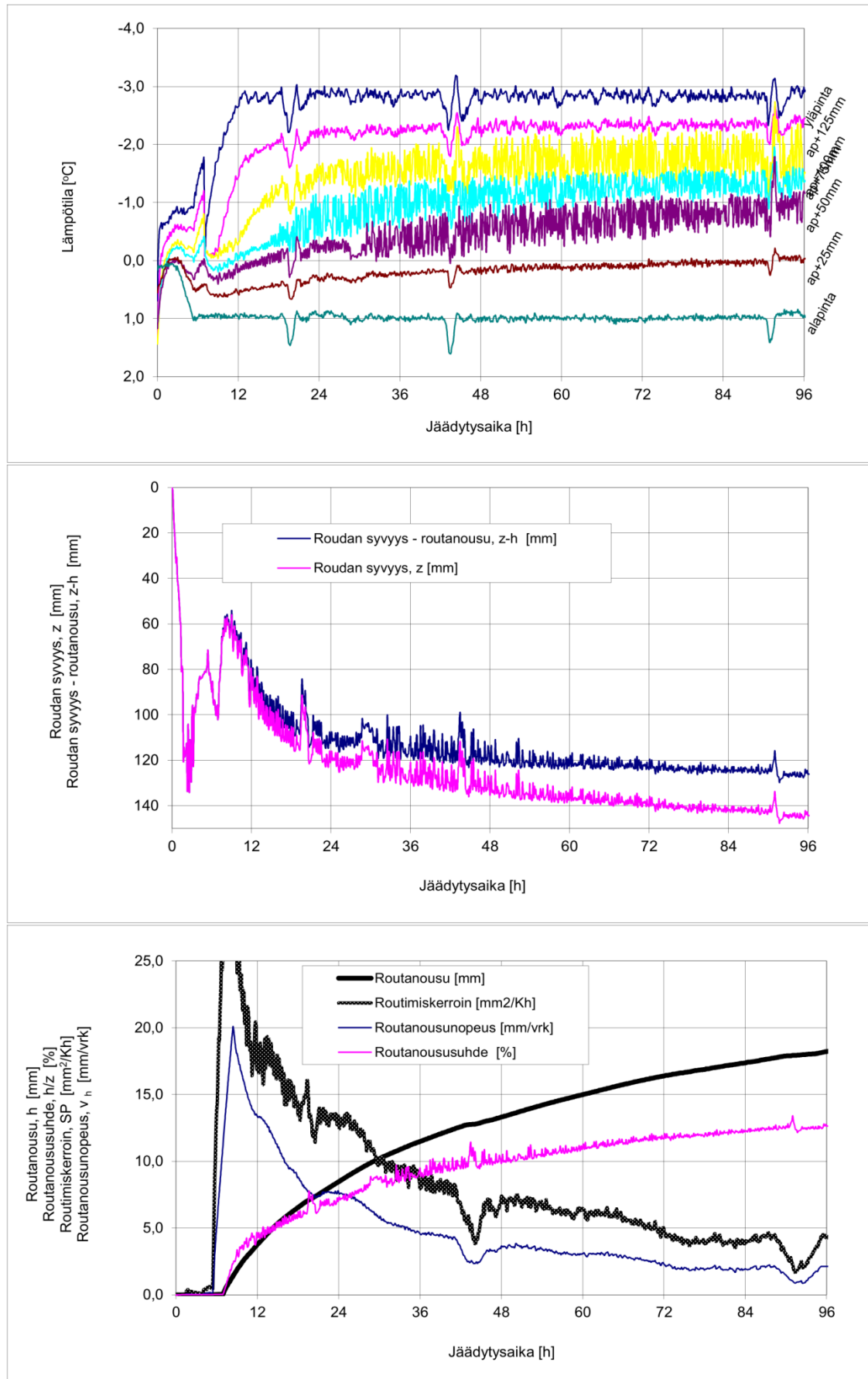
Näyte Paltamo tukikerros



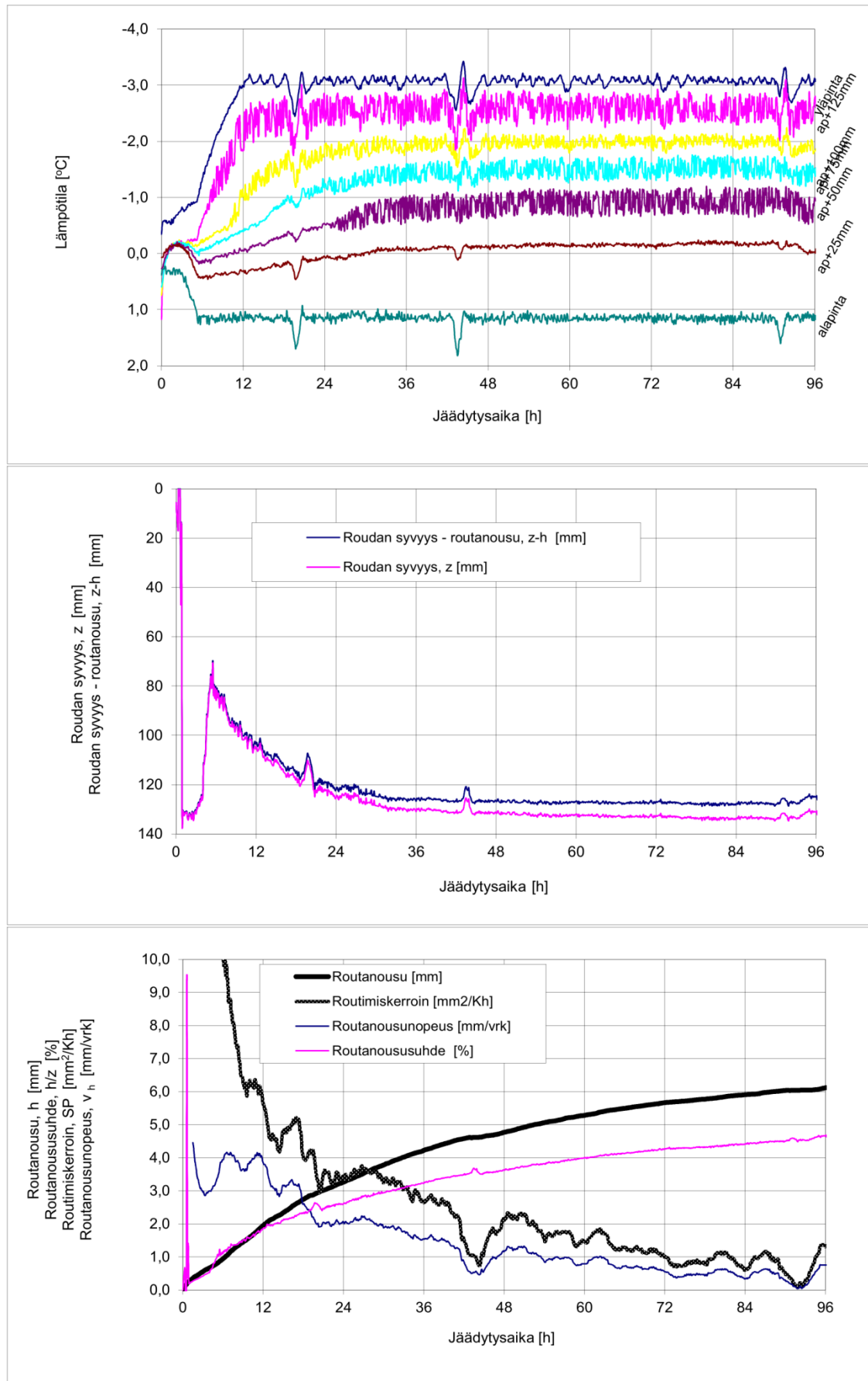
Näyte Varkaus tukikerros



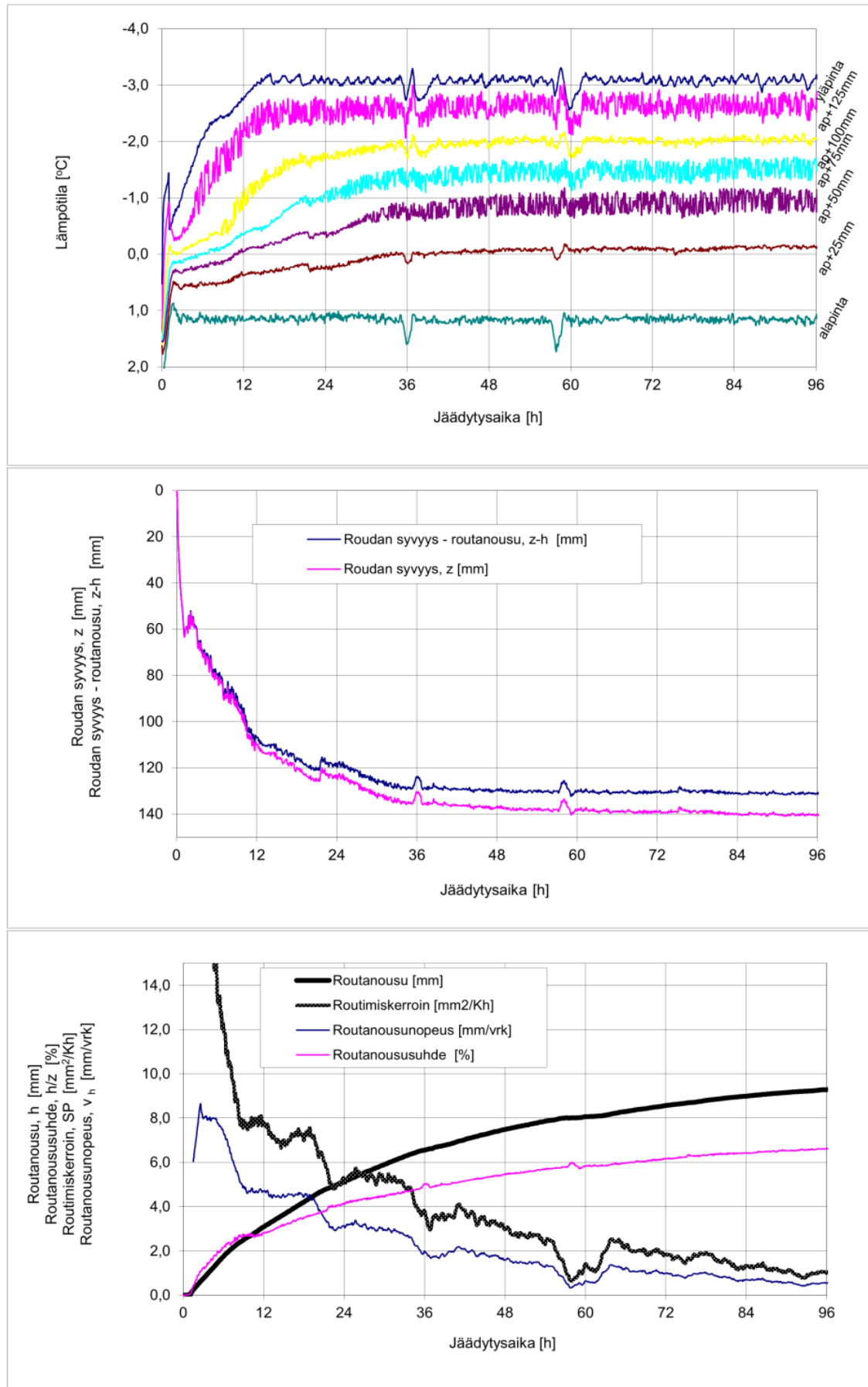
Näyte Viiala tukikerros



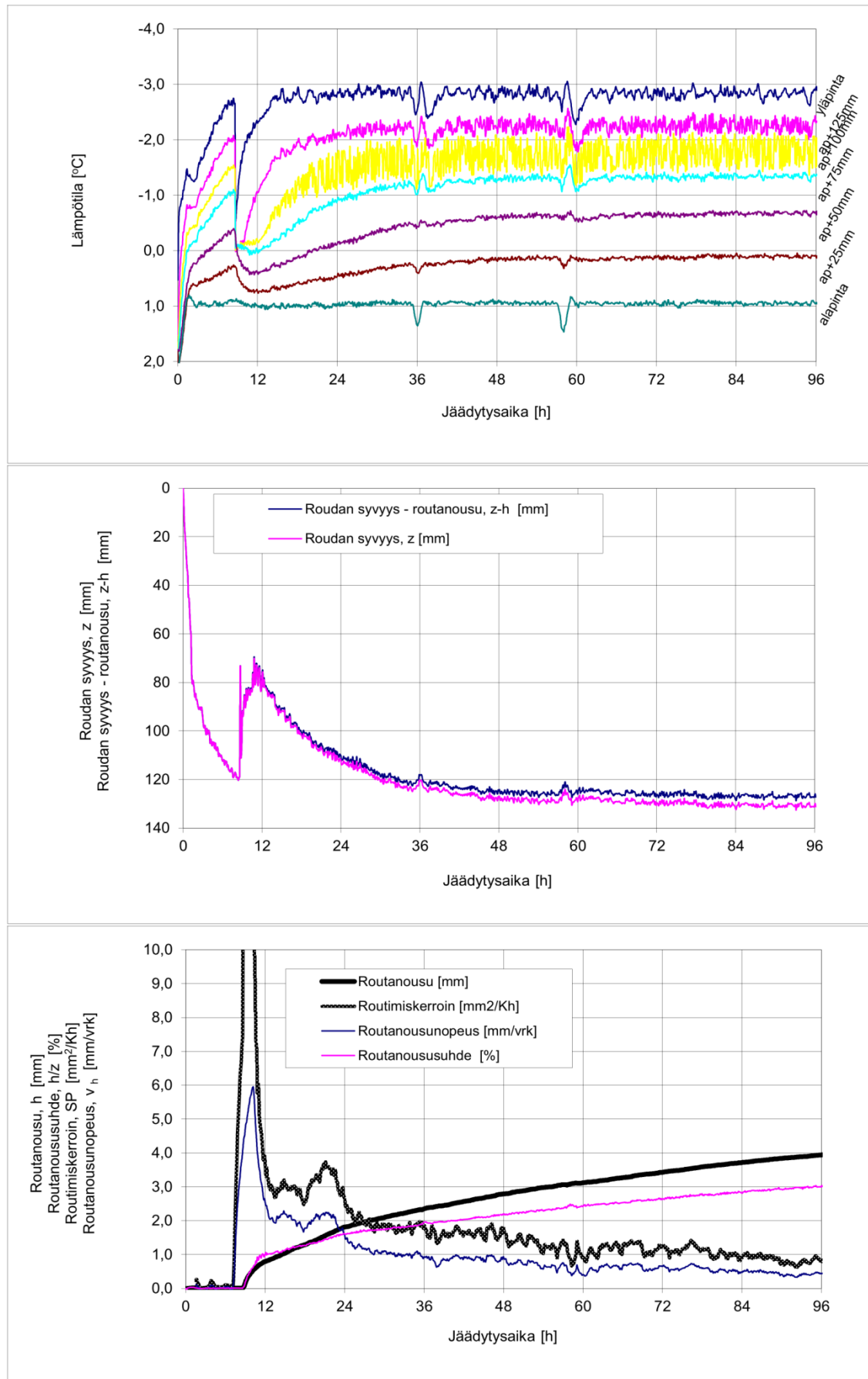
Näyte Karkku alusrakennekerros



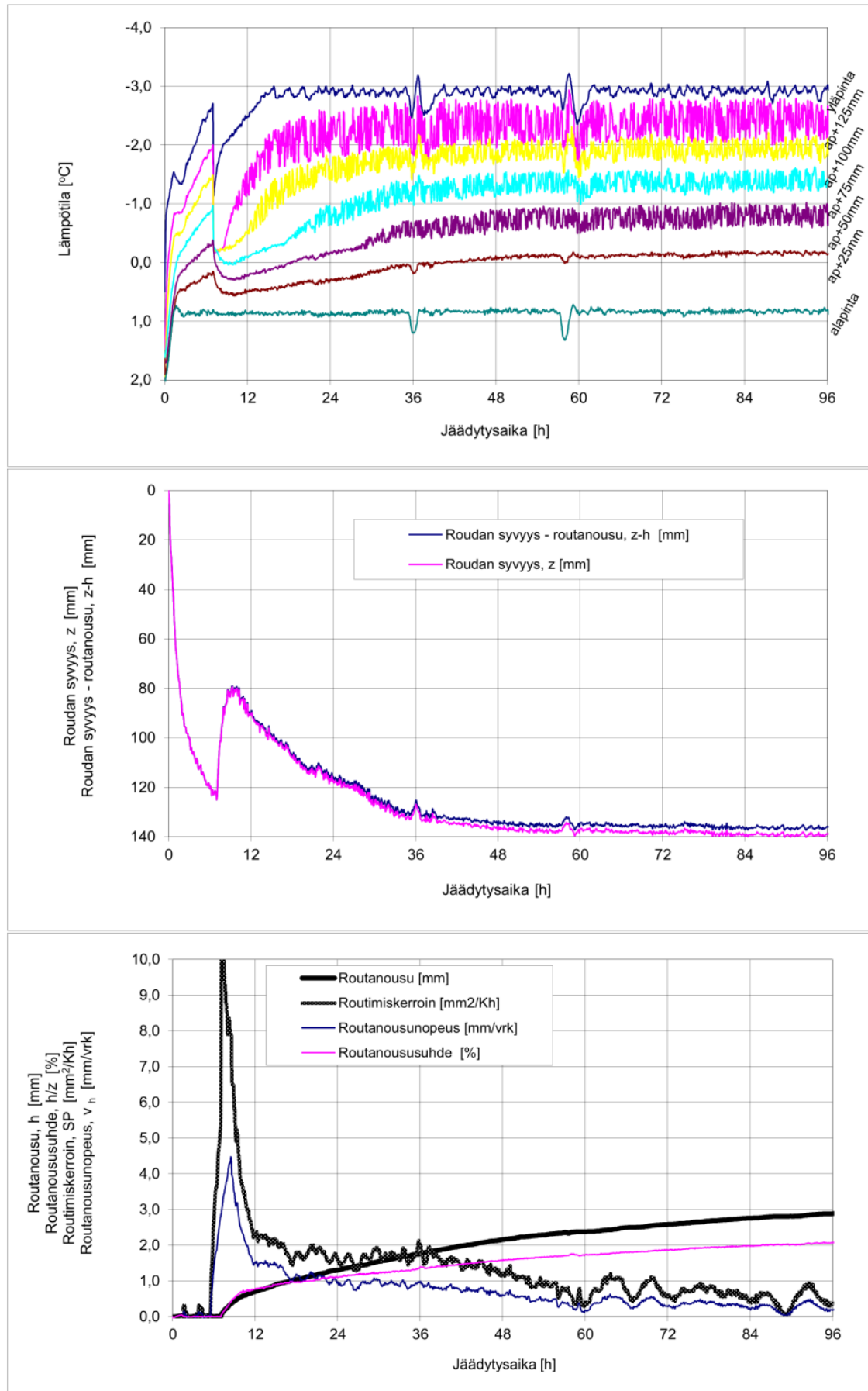
Näyte Kitee alusrakennekerros



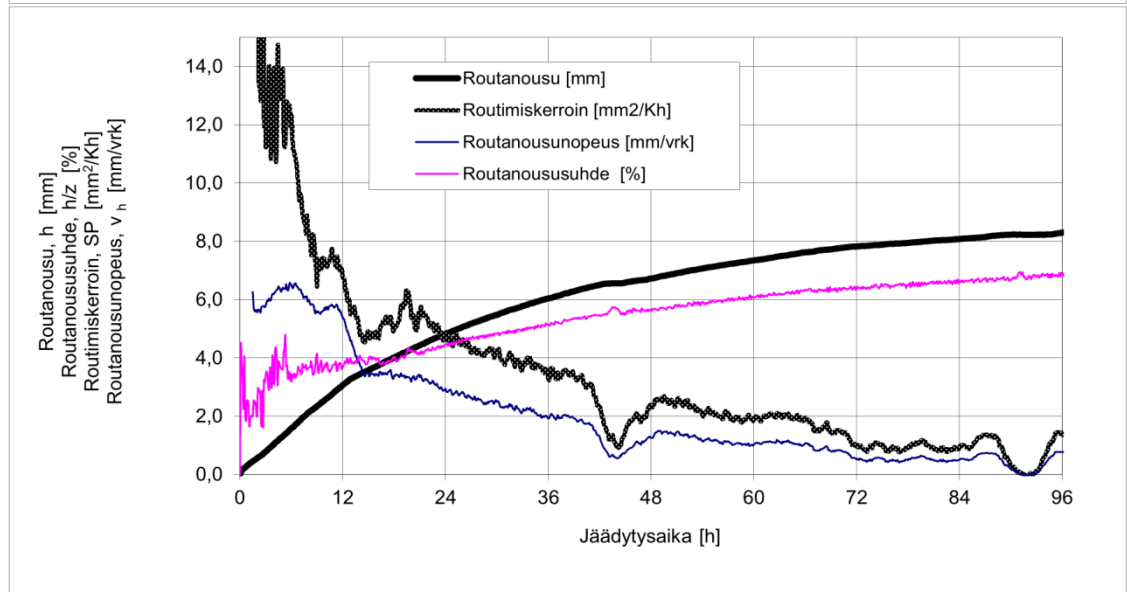
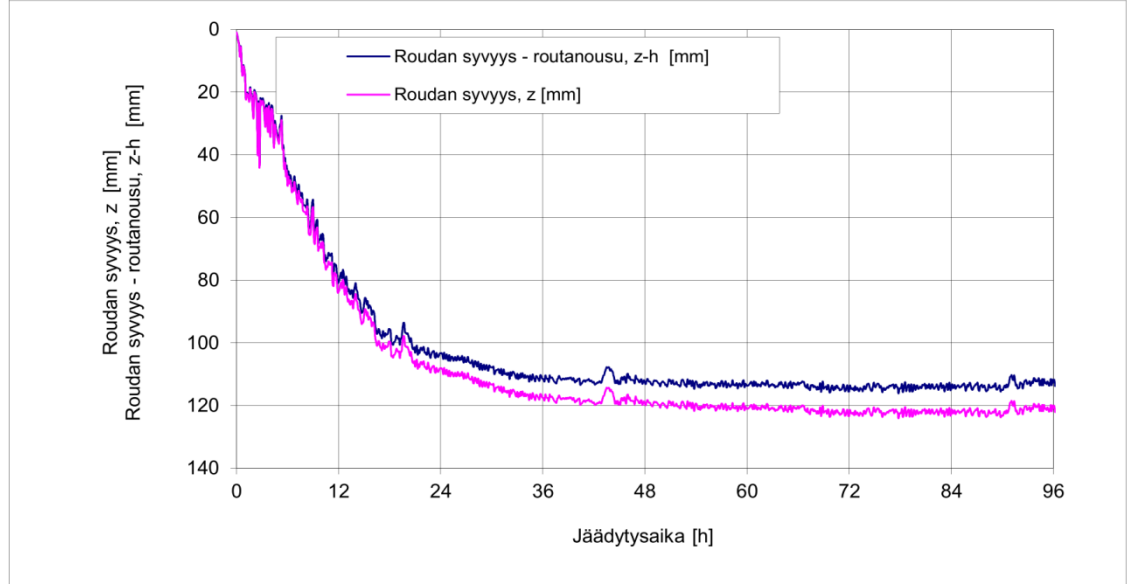
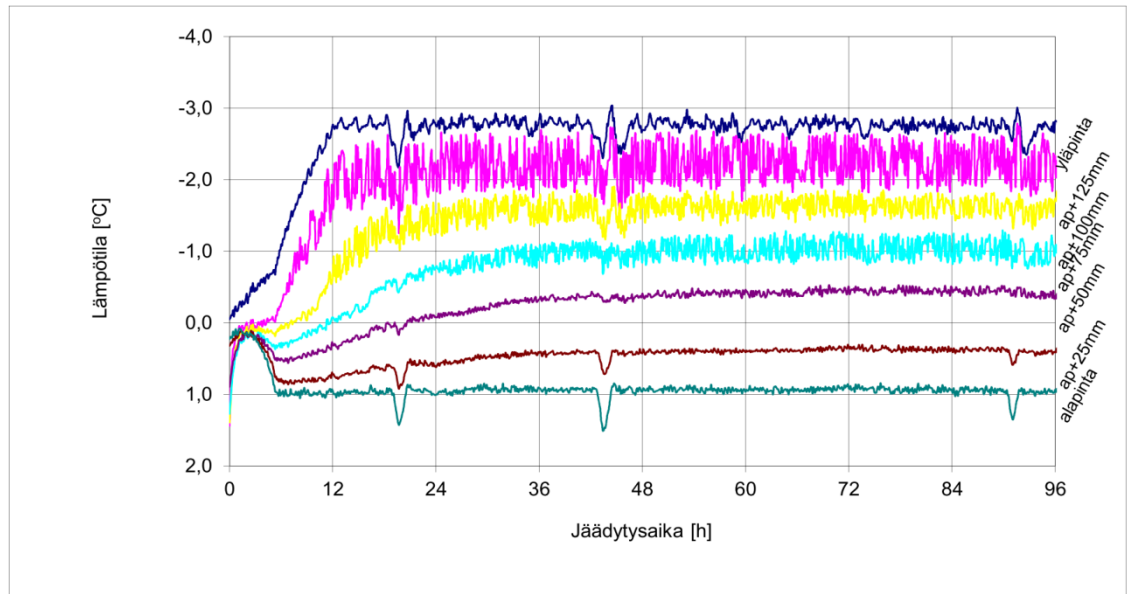
Näyte Kuopio alusrakennekerros



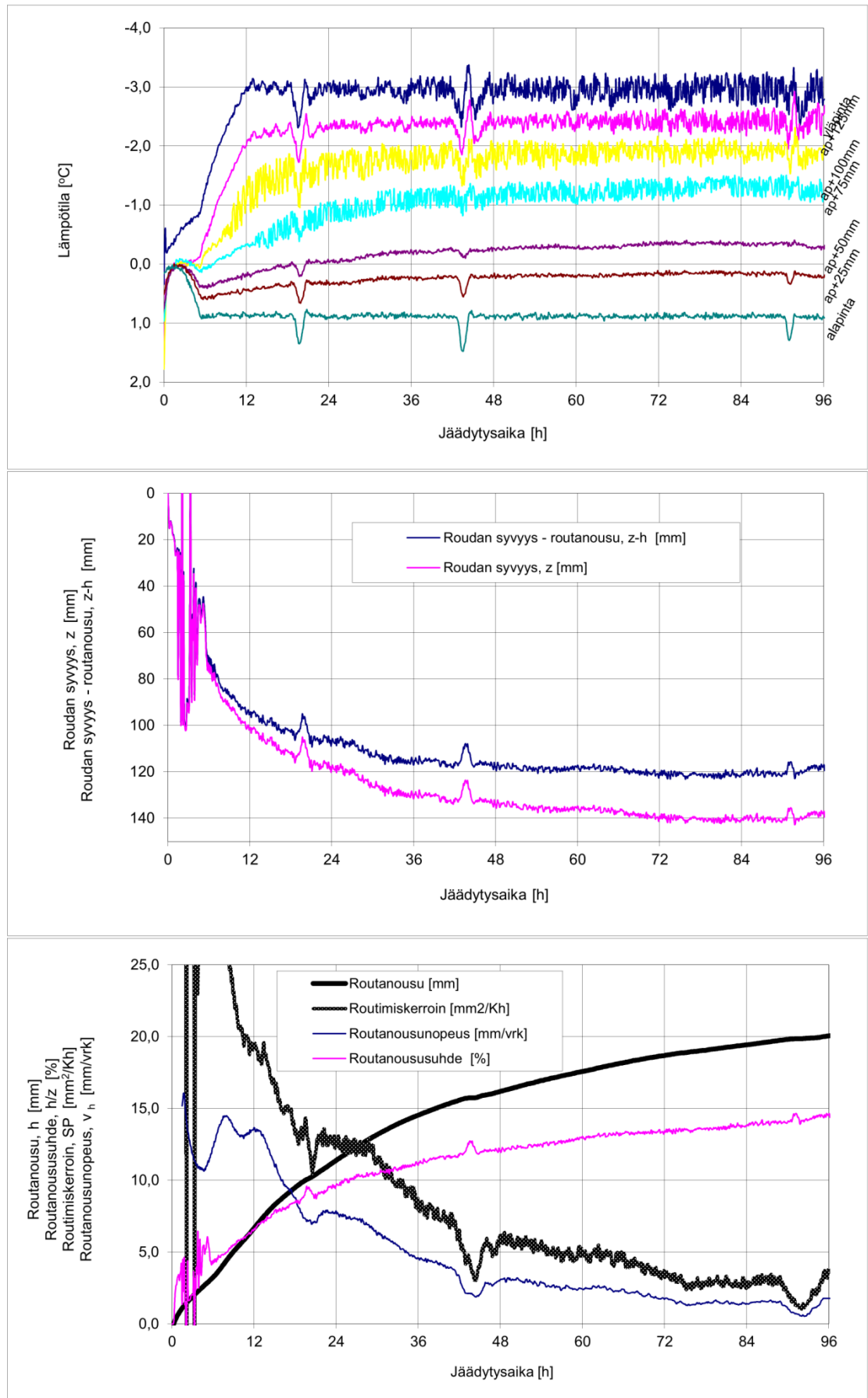
Näyte Liminka alusrakennekerros



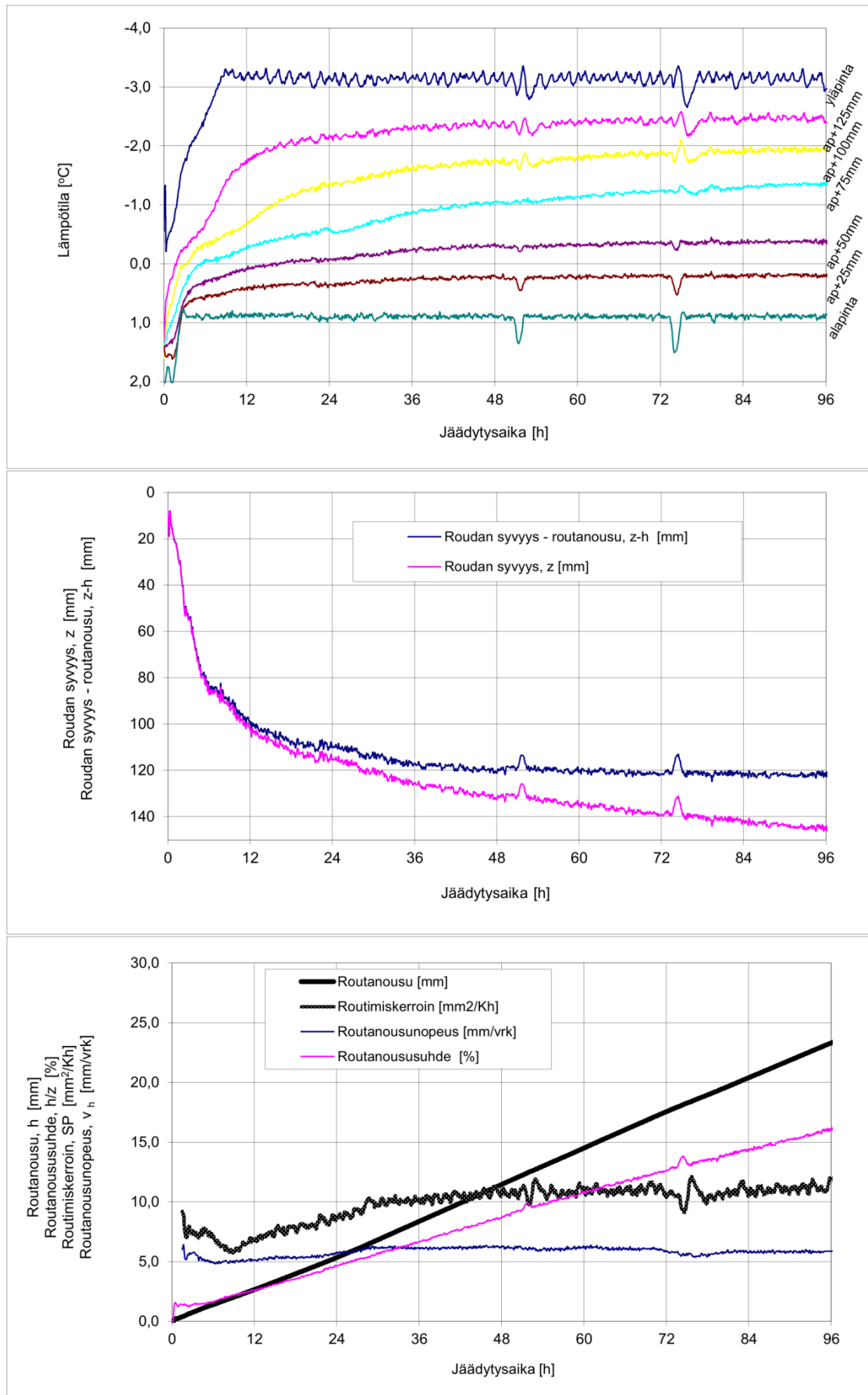
Näyte Paltamo alusrakennekerros



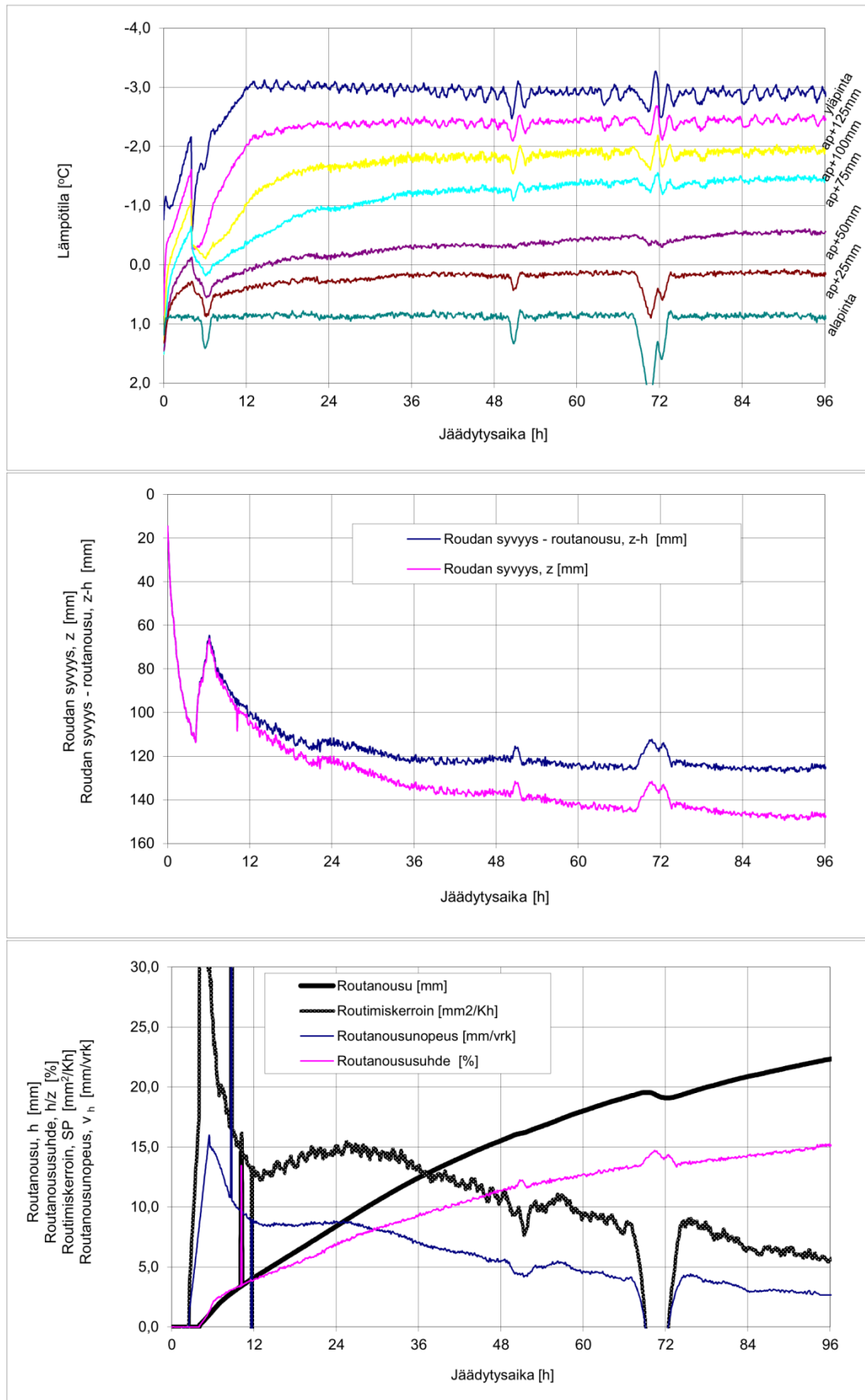
Näyte Varkaus alusrakennekerros



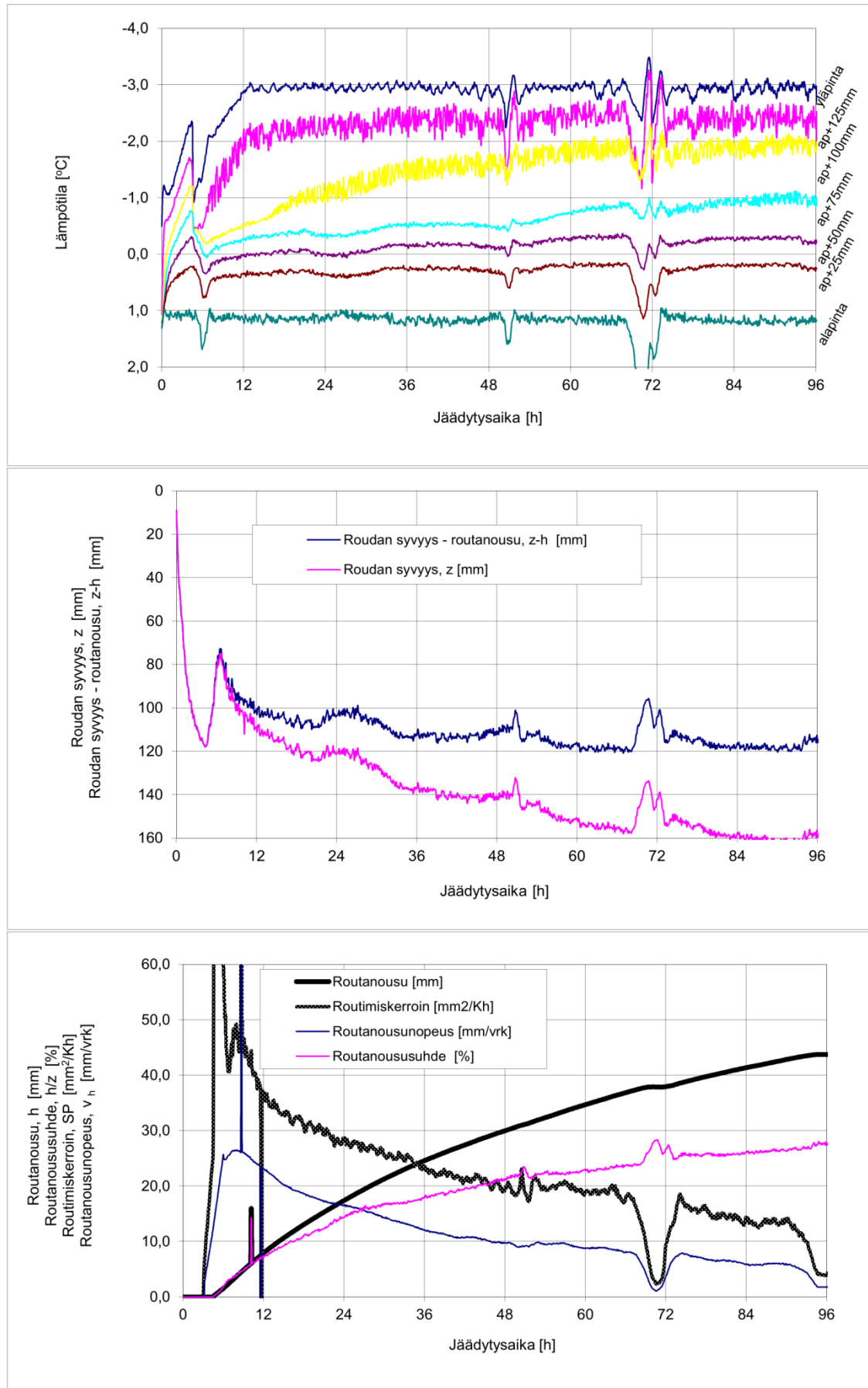
Näyte Viiala alusrakennekerros



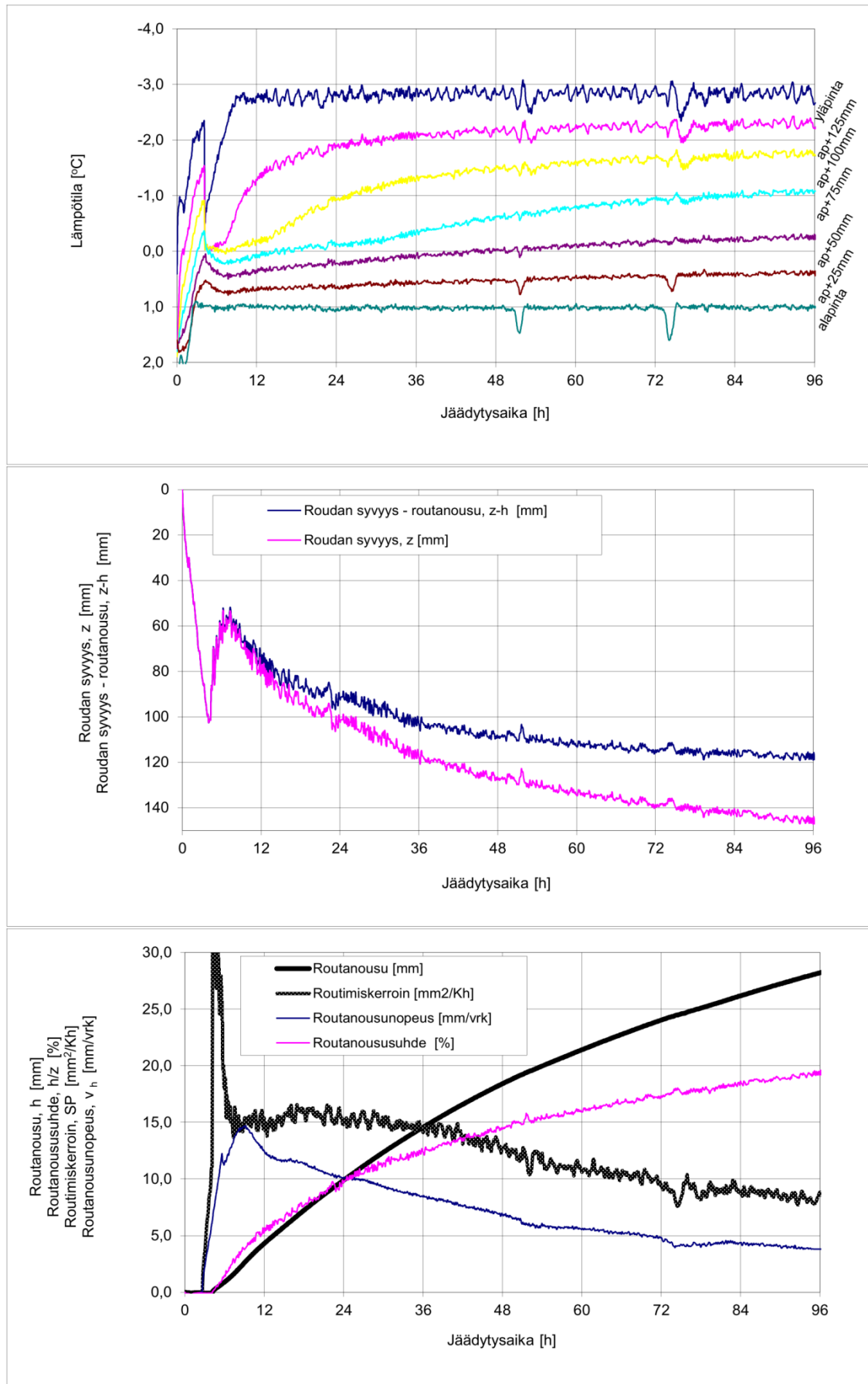
Näyte Karkku pohjamaa



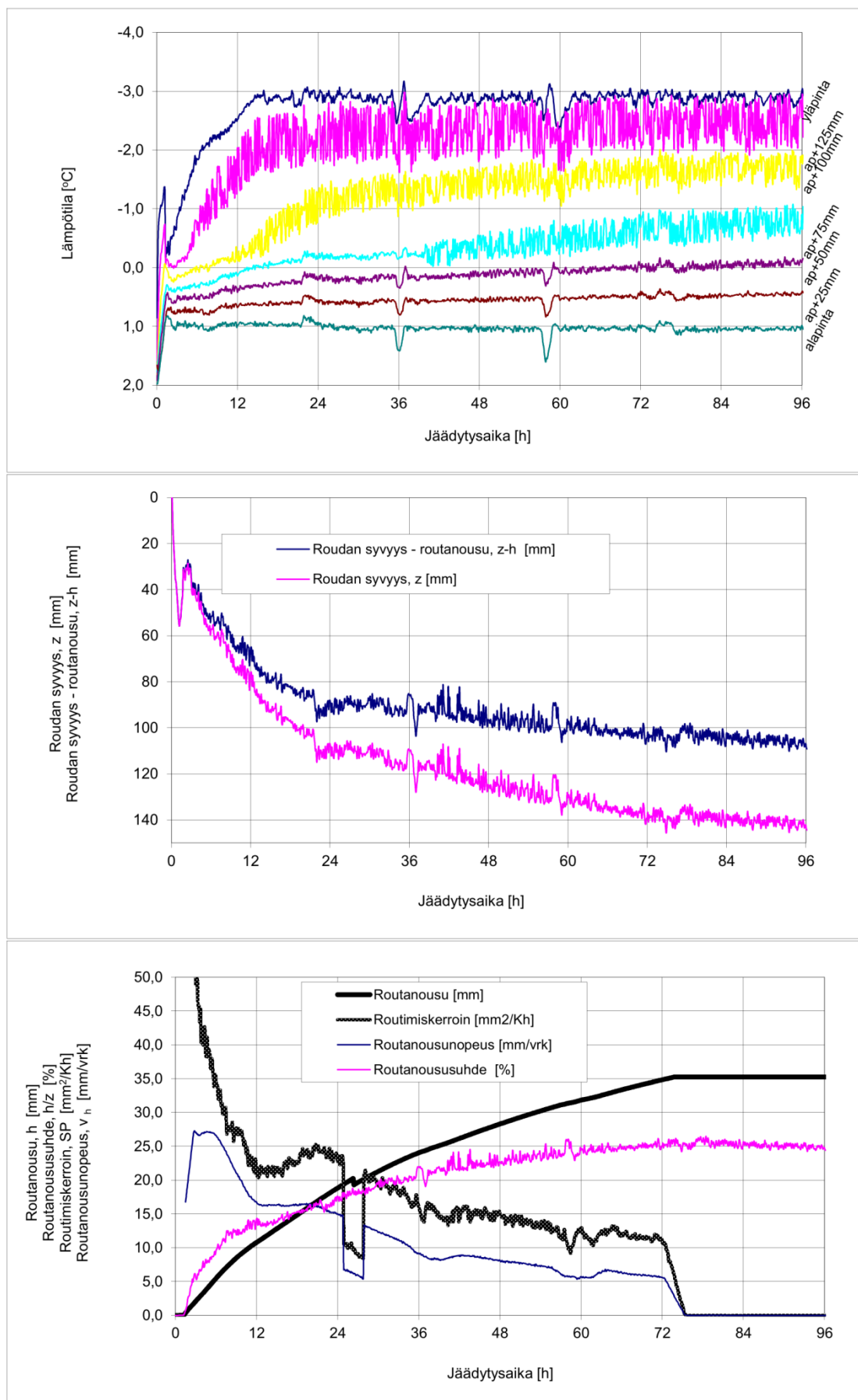
Näyte Kitee pohjamaa



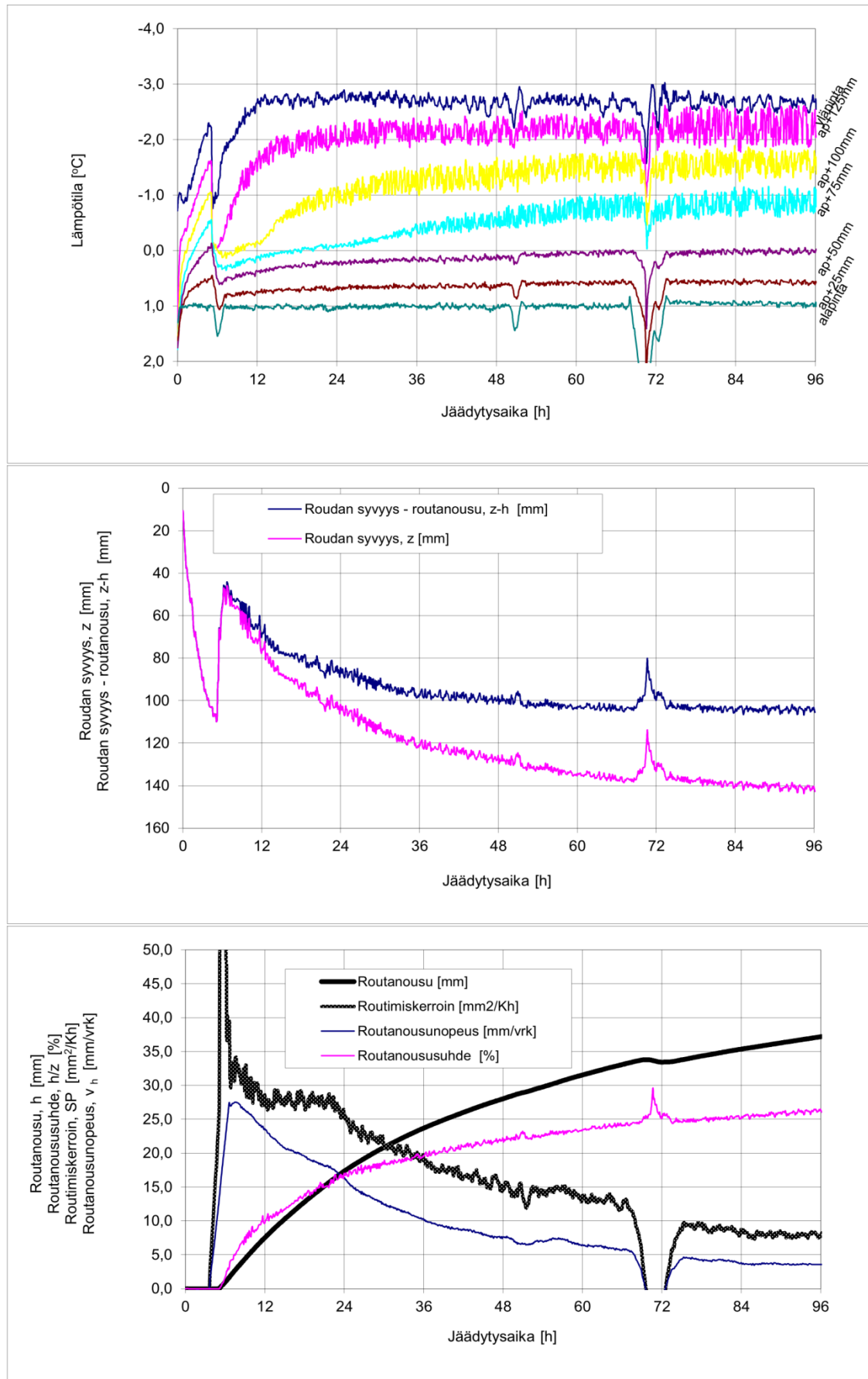
Näyte Kuopio pohjamaa

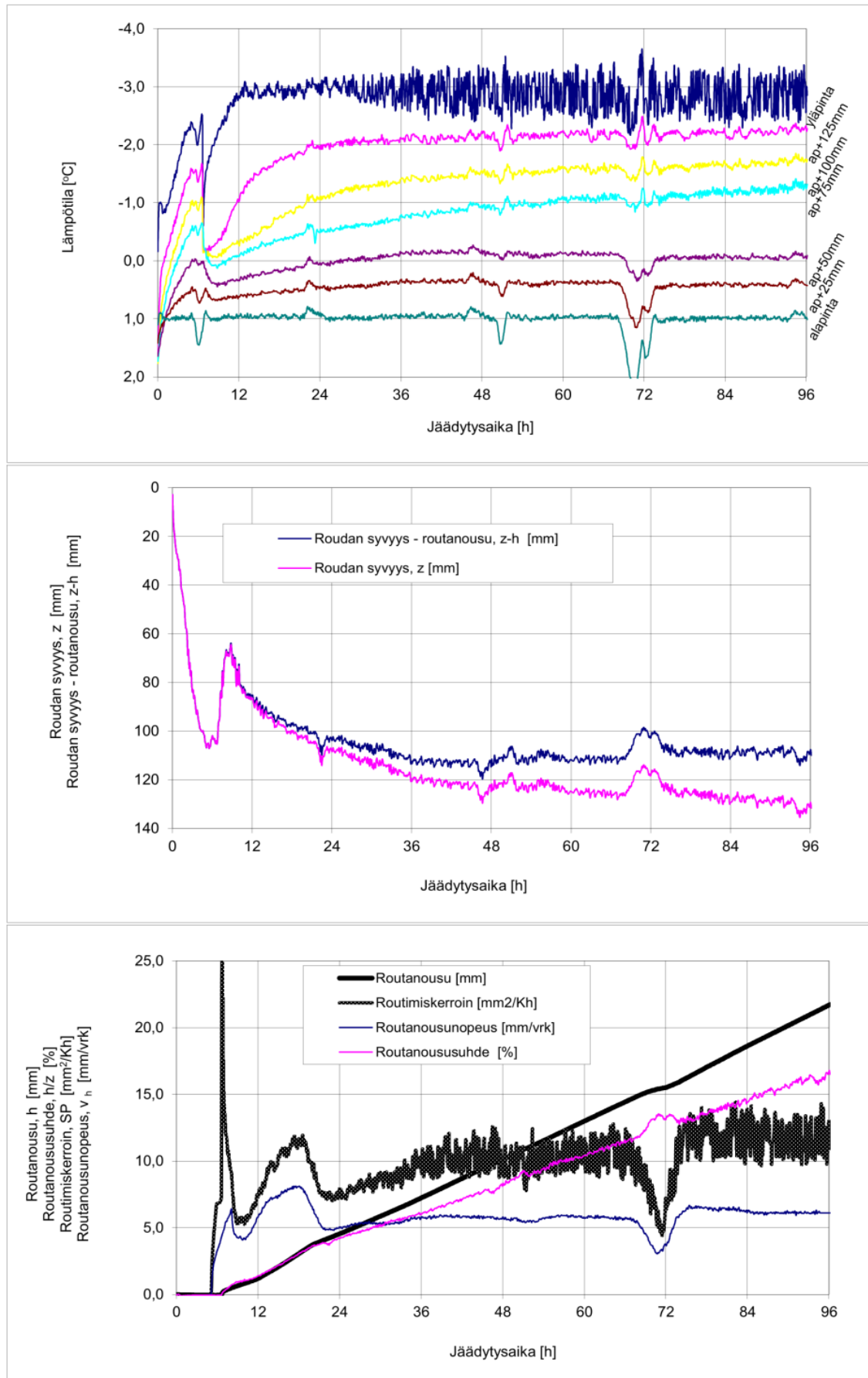


Näyte Liminka pohjamaa



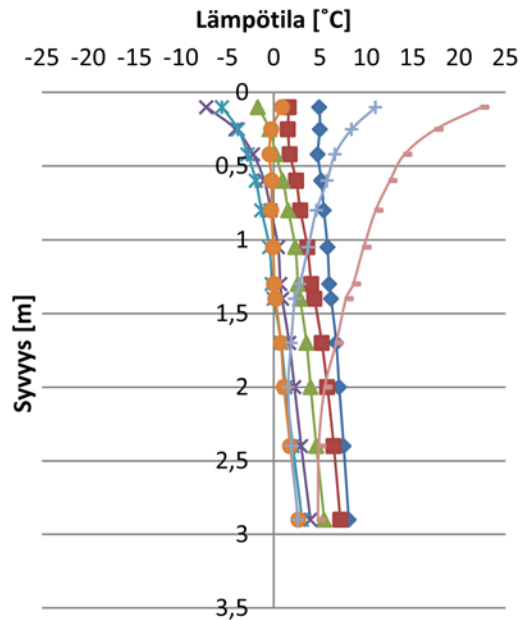
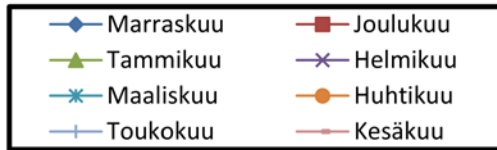
Näyte Paltamo pohjamaa



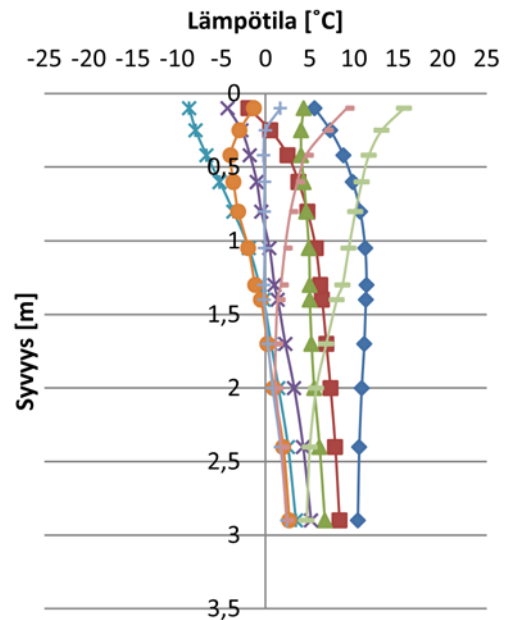
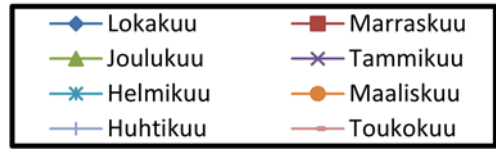


Näyte Viiala pohjamaa

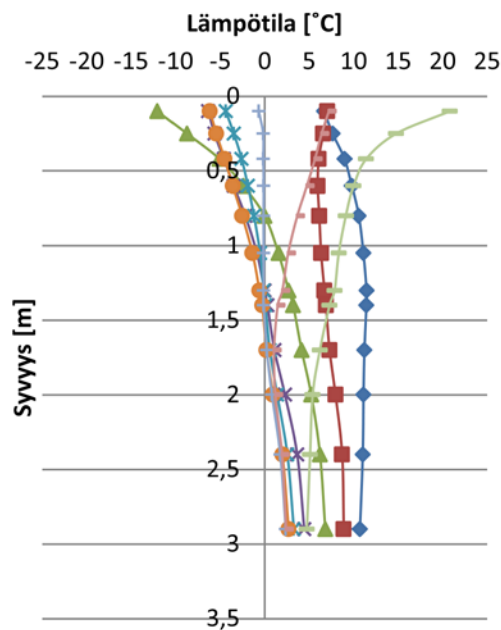
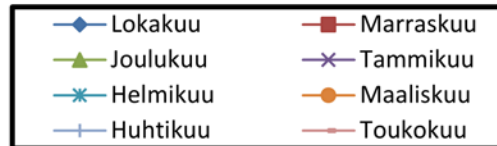
Karkku lämpötilaprofiili 2008-2009



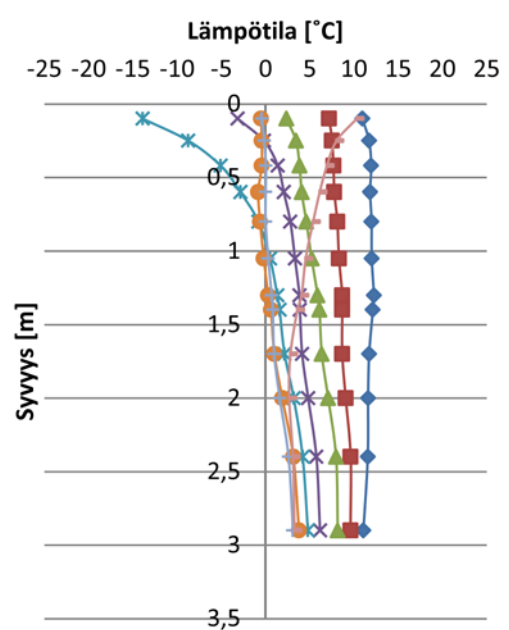
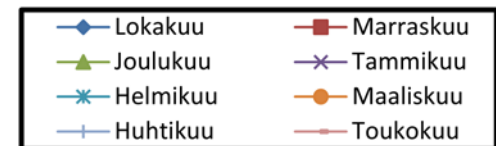
Karkku lämpötilaprofiili 2009-2010



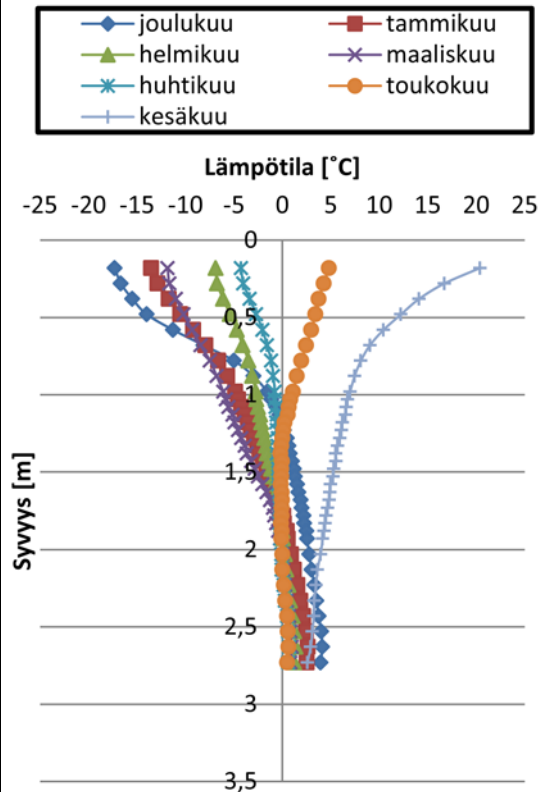
Karkku lämpötilaprofiili 2010-2011



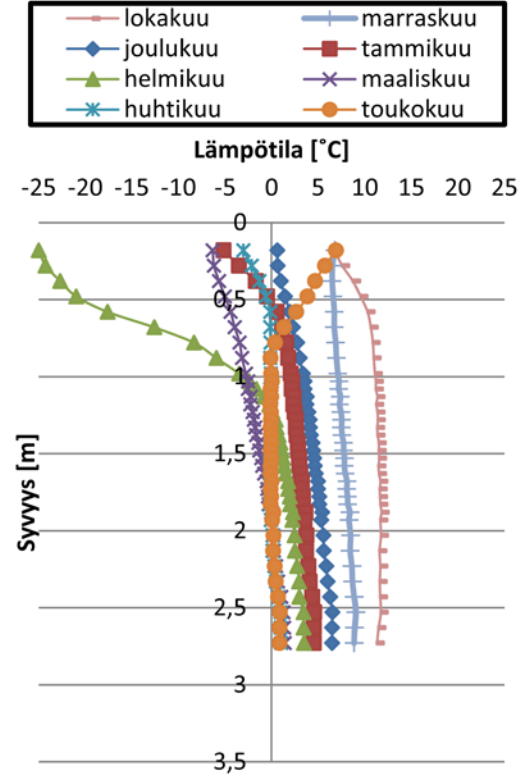
Karkku lämpötilaprofiili 2011-2012



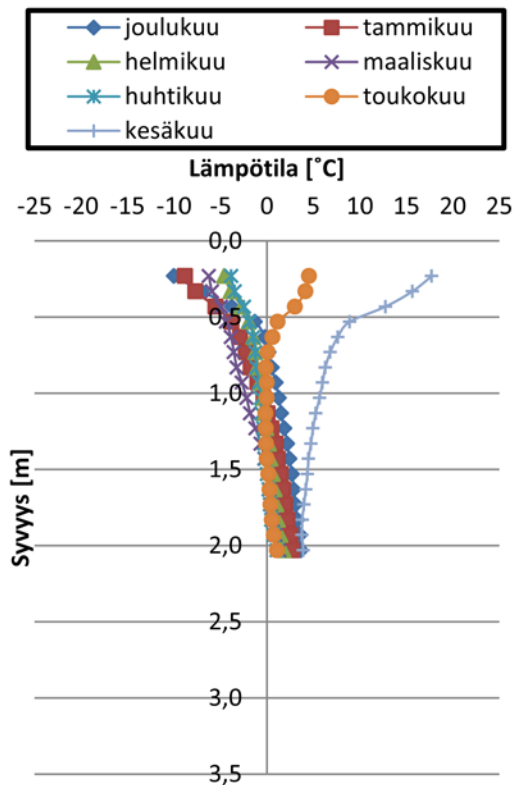
Kitee lämpötilaprofiili 2010-2011



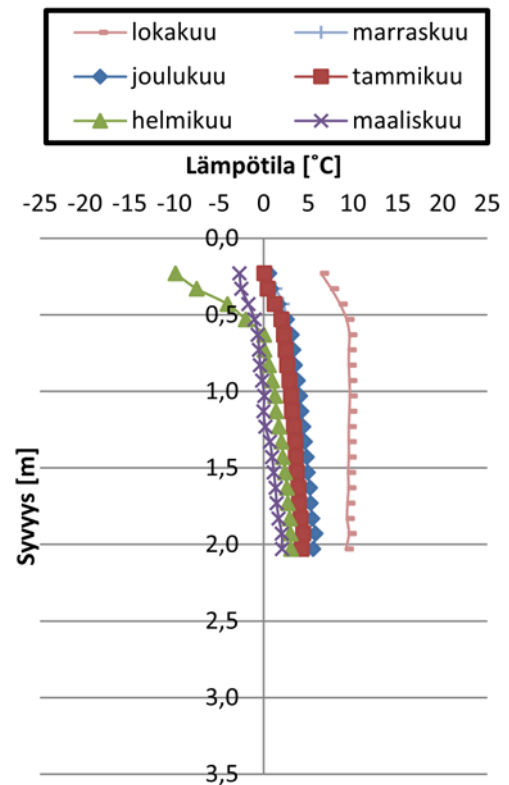
Kitee lämpötilaprofiili 2011-2012



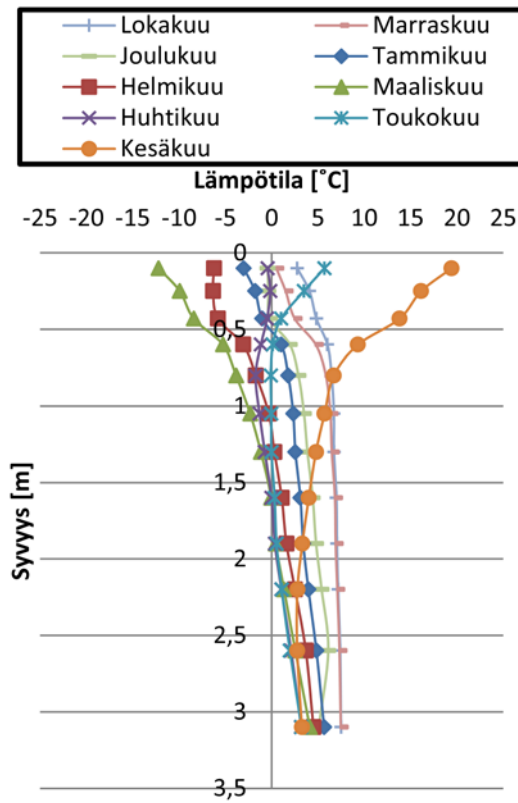
Kuopio lämpötilaprofiili 2010-2011



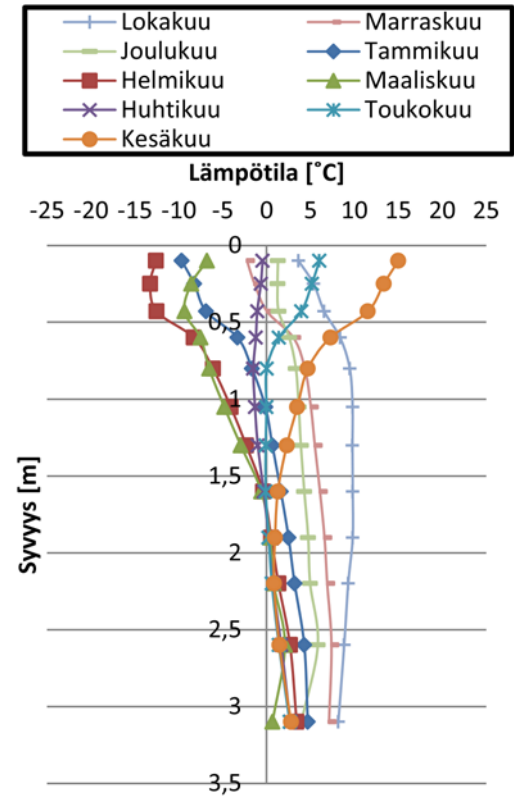
Kuopio lämpötilaprofiili 2011-2012



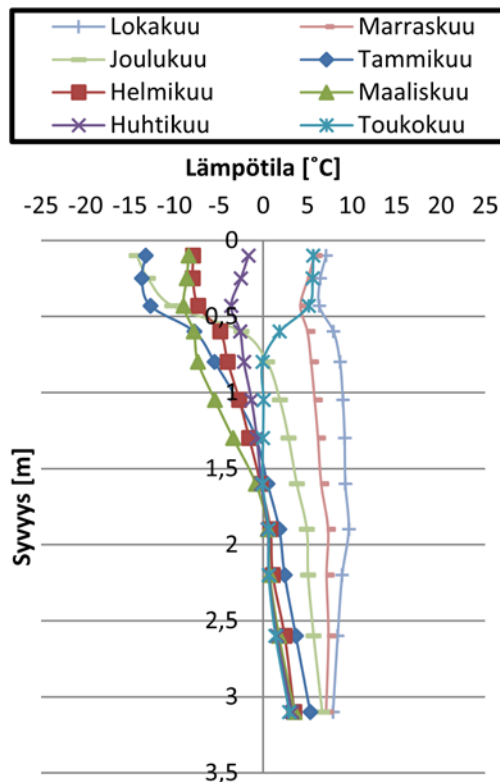
Liminka lämpötilaprofiili 2008-2009



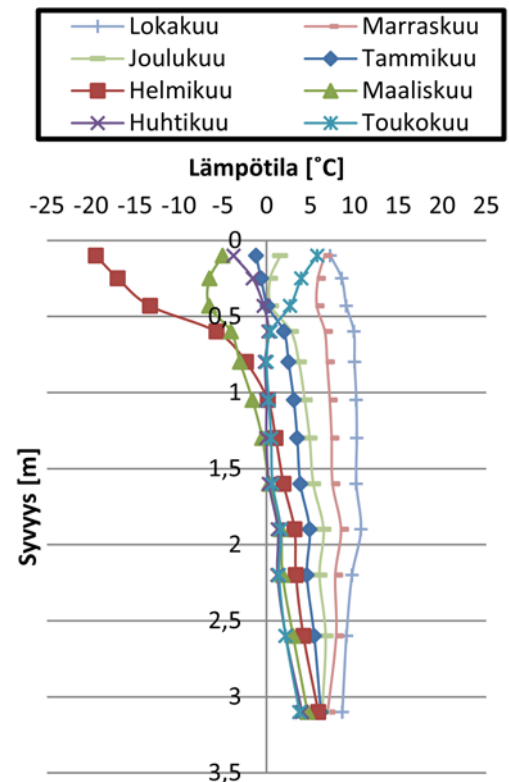
Liminka lämpötilaprofiili 2009-2010



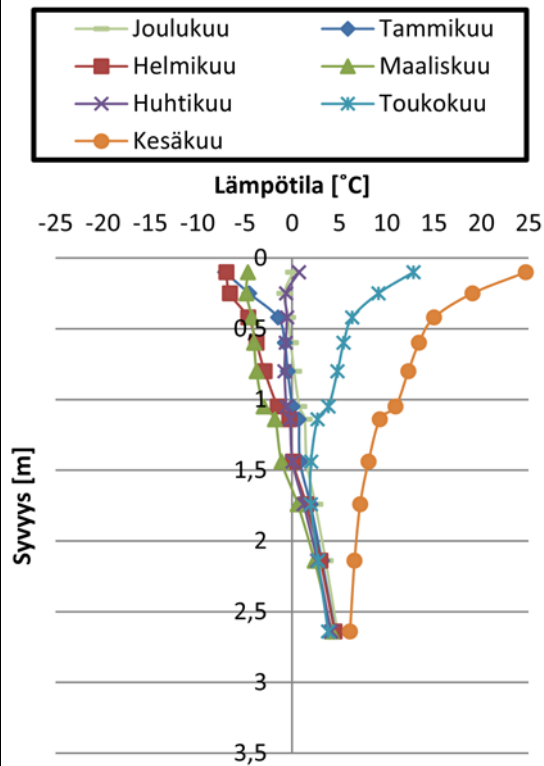
Liminka lämpötilaprofiili 2010-2011



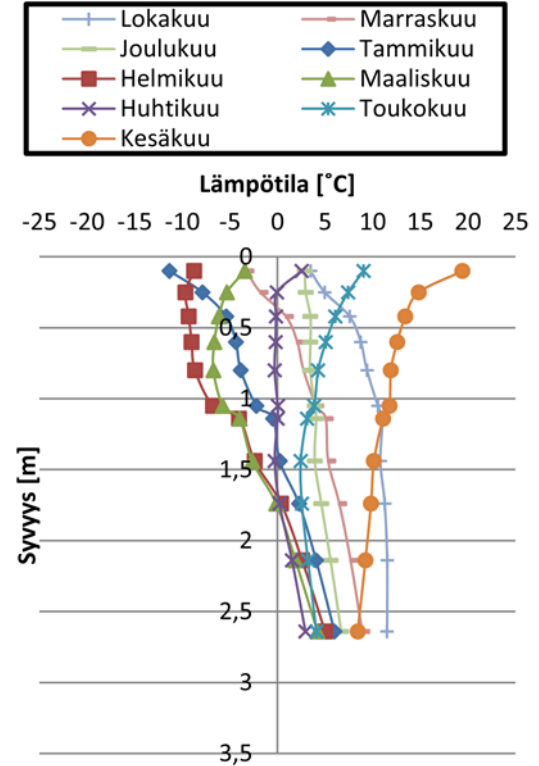
Liminka lämpötilaprofiili 2011-2012



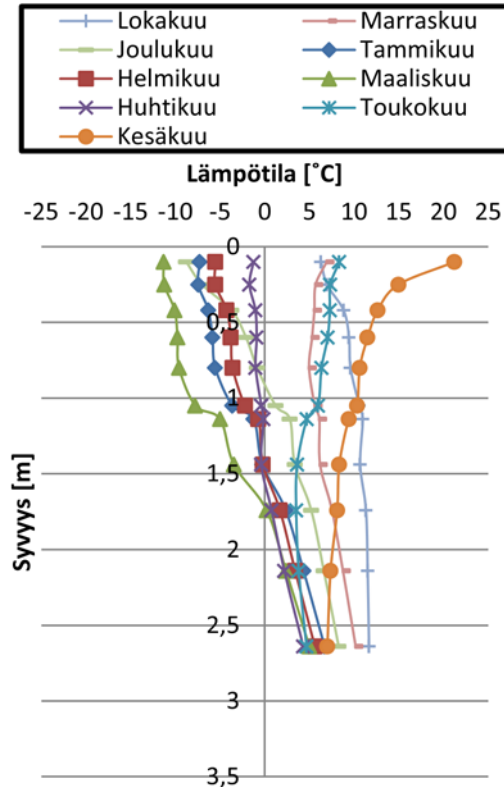
Mäntsälä lämpötilaprofiili 2008-2009



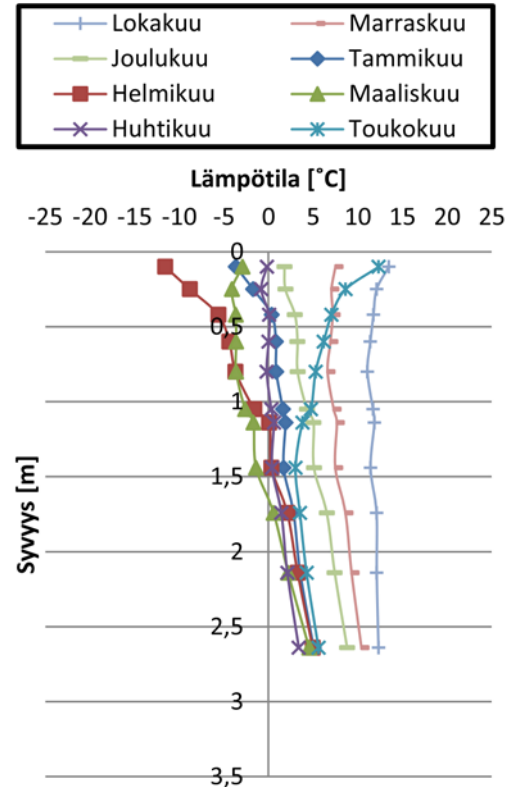
Mäntsälä lämpötilaprofiili 2009-2010



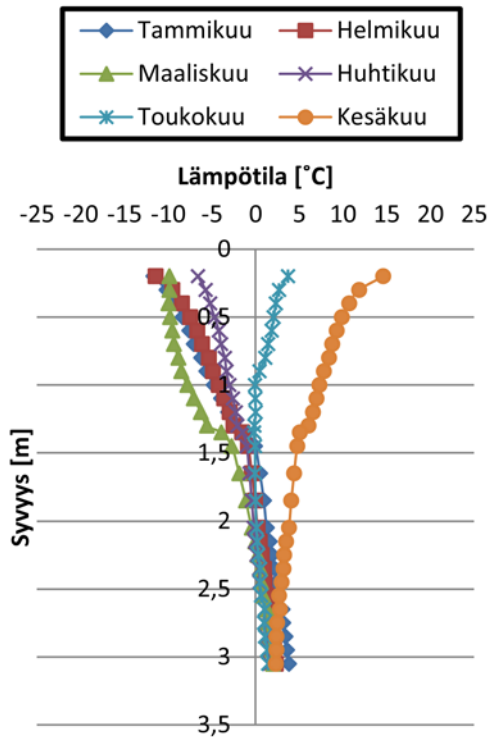
Mäntsälä lämpötilaprofiili 2010-2011



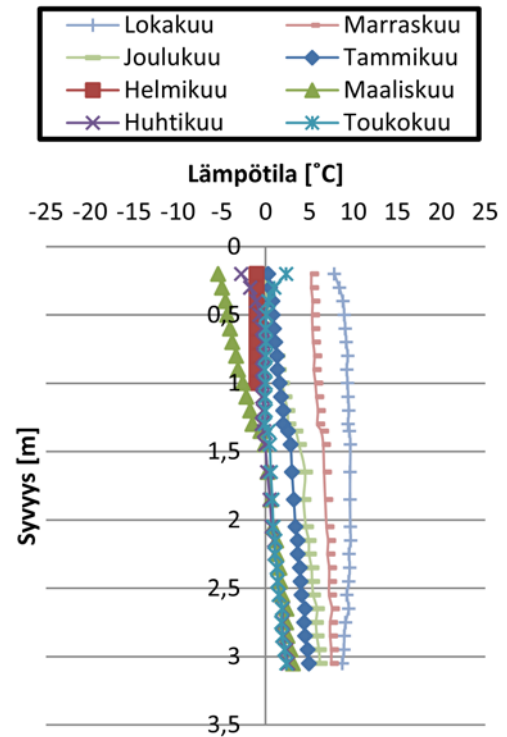
Mäntsälä lämpötilaprofiili 2011-2012



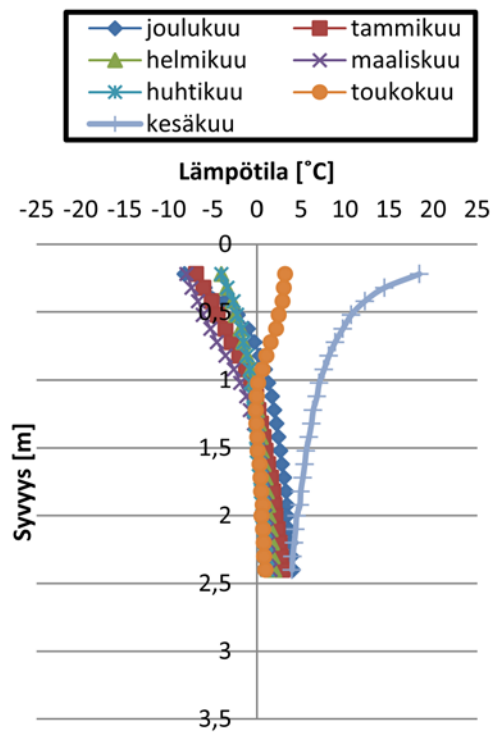
Paltamo lämpötilaprofiili 2010-2011



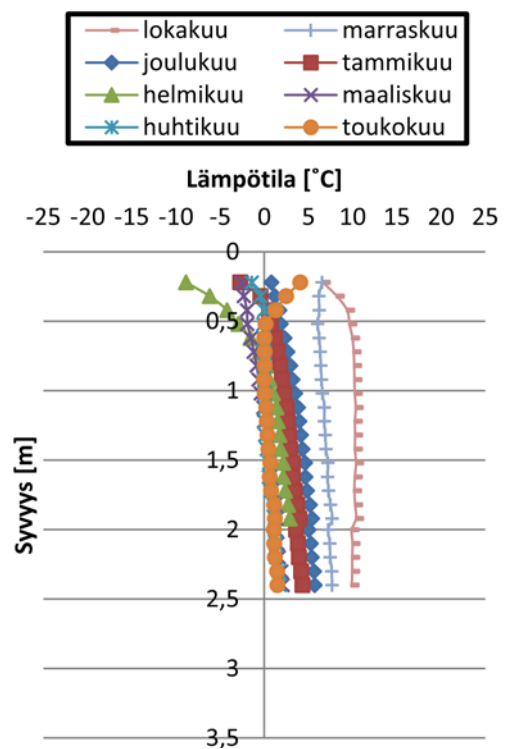
Paltamo lämpötilaprofiili 2010-2011



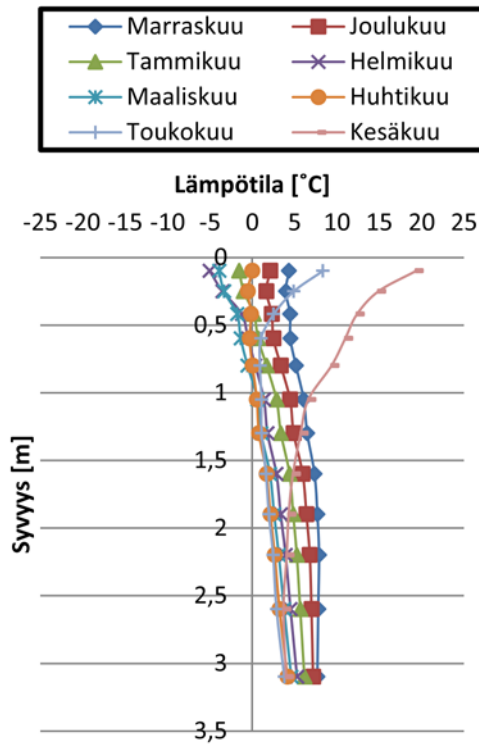
Varkaus lämpötilaprofiili 2010-2011



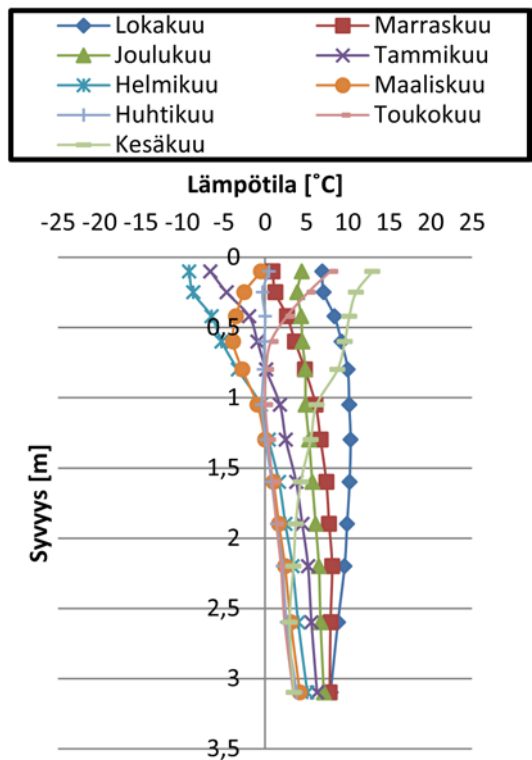
Varkaus lämpötilaprofiili 2011-2012



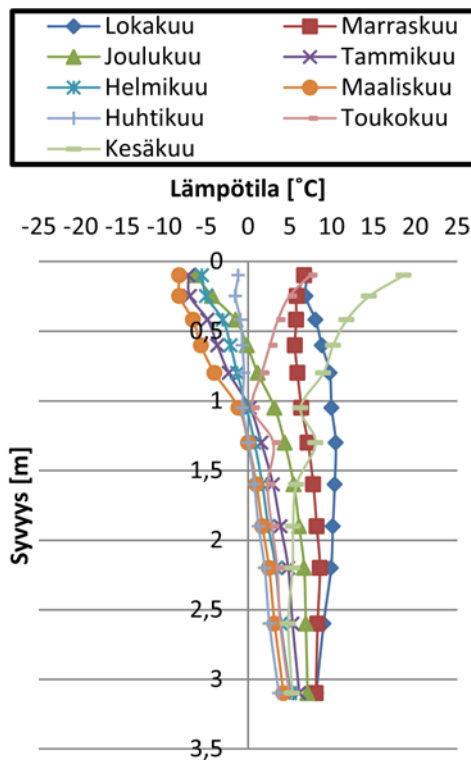
Viiala lämpötilaprofiili 2008-2009



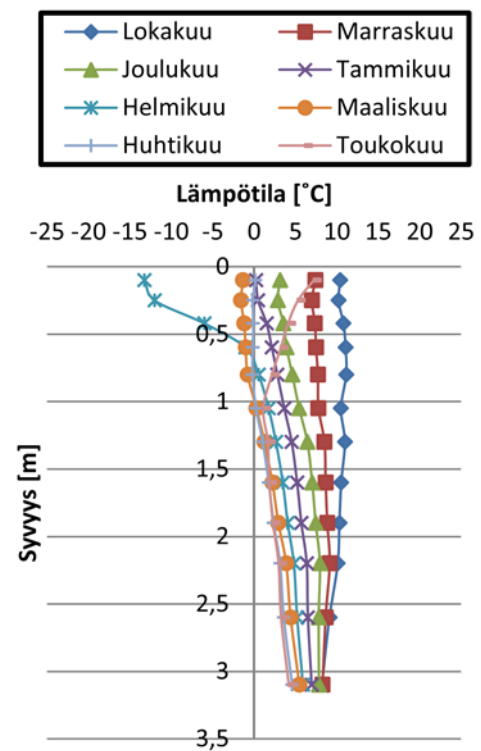
Viiala lämpötilaprofiili 2009-2010



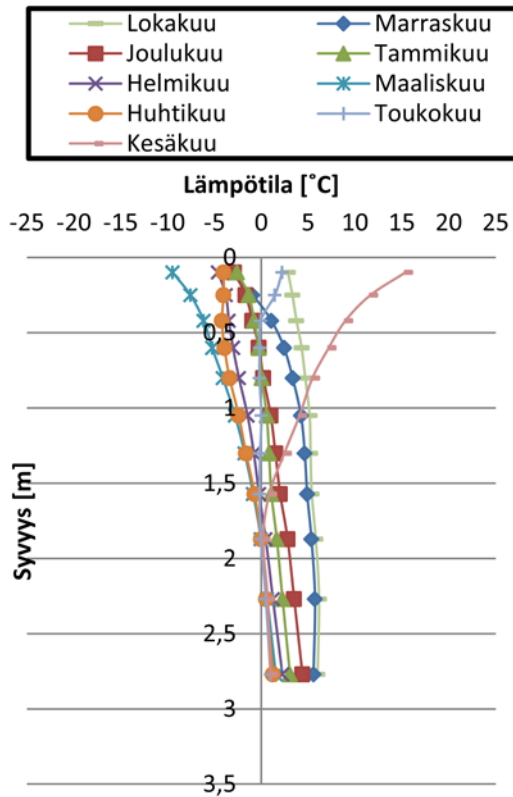
Viiala lämpötilaprofiili 2010-2011



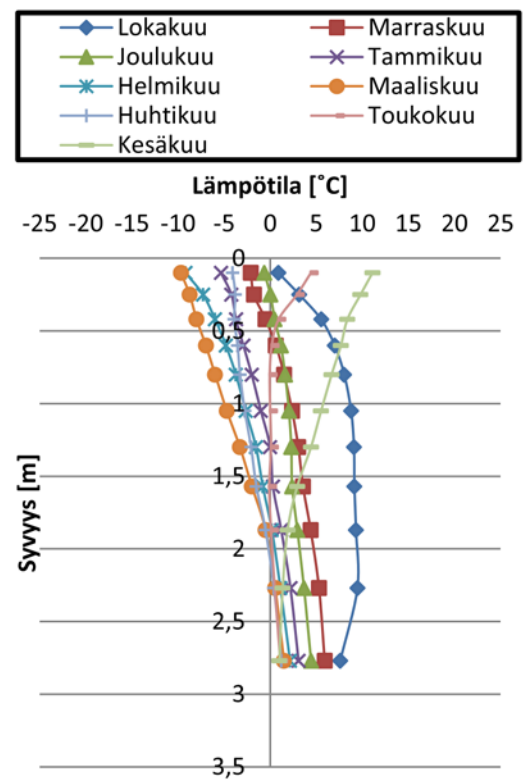
Viiala lämpötilaprofiili 2011-2012



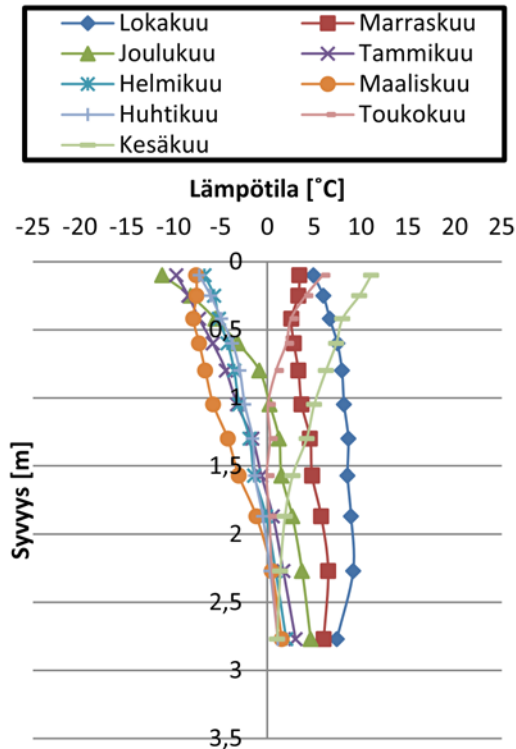
TOR 899 lämpötilaprofiili 2008-2009



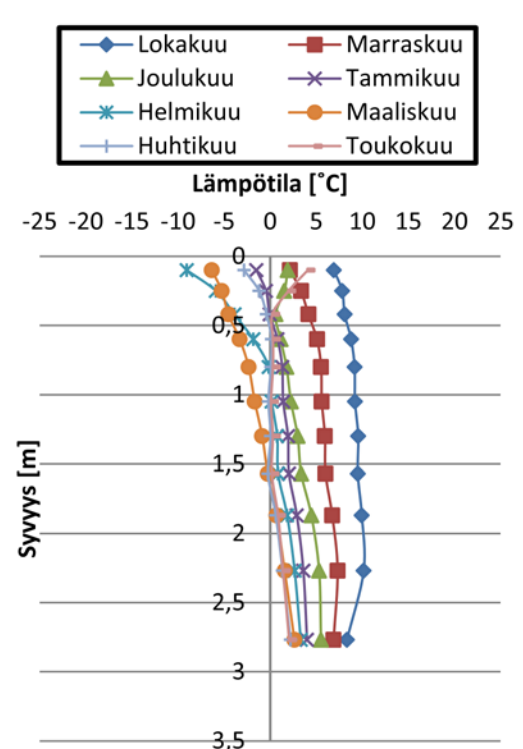
TOR 899 lämpötilaprofiili 2009-2010



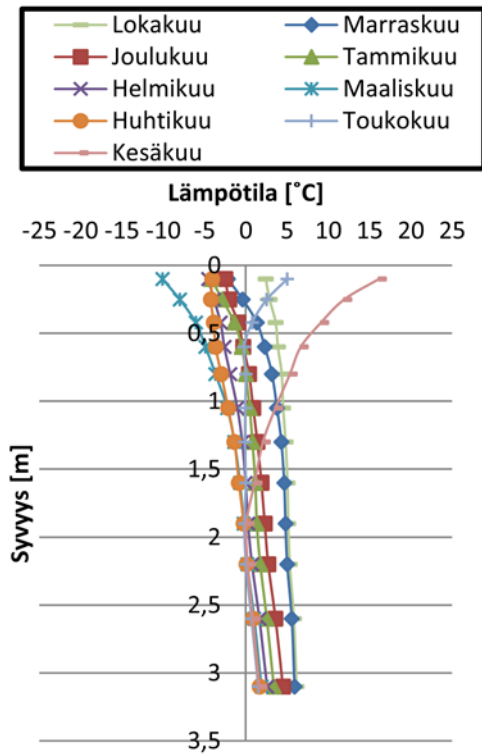
TOR 899 lämpötilaprofiili 2010-2011



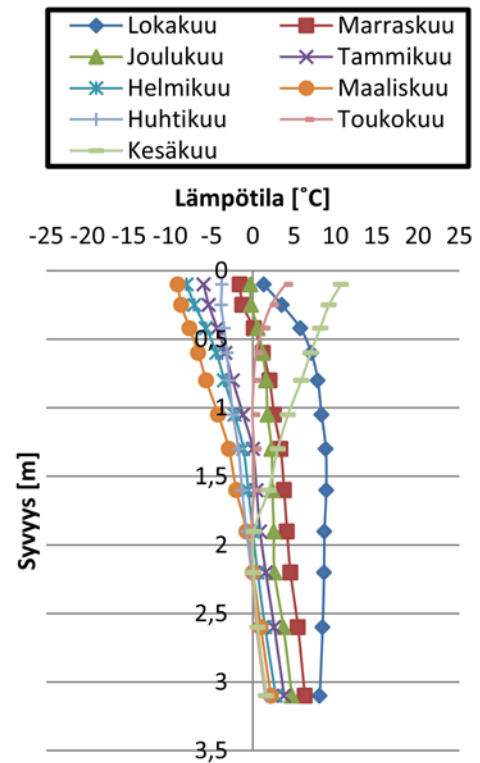
TOR 899 lämpötilaprofiili 2011-2012



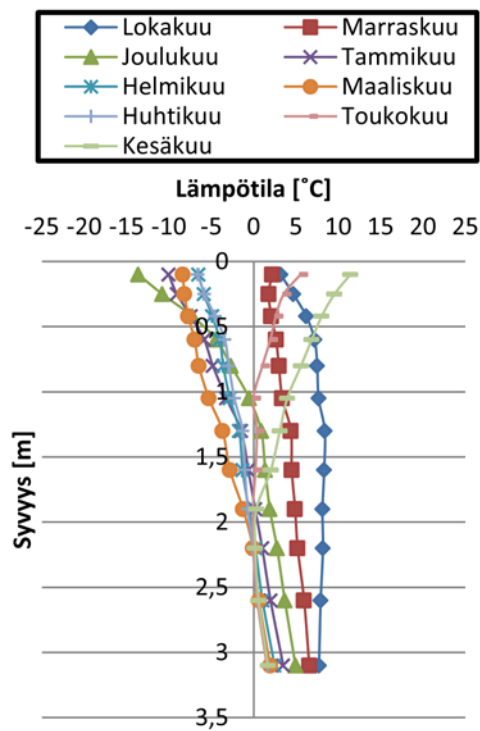
TOR 909 lämpötilaprofiili 2008-2009



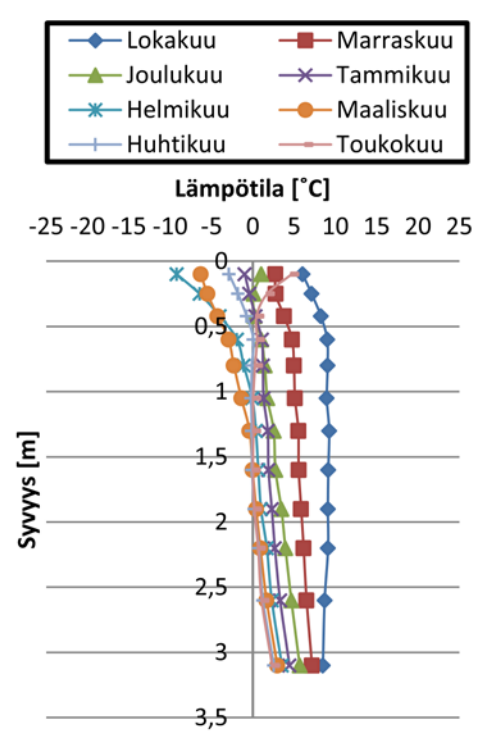
TOR 909 lämpötilaprofiili 2009-2010

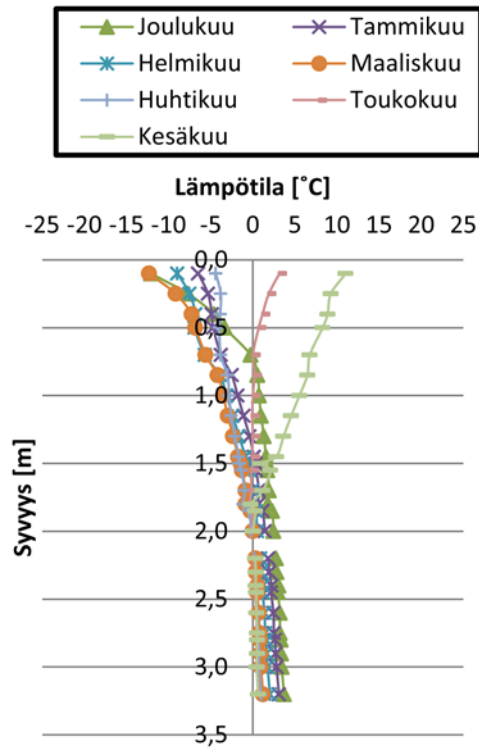
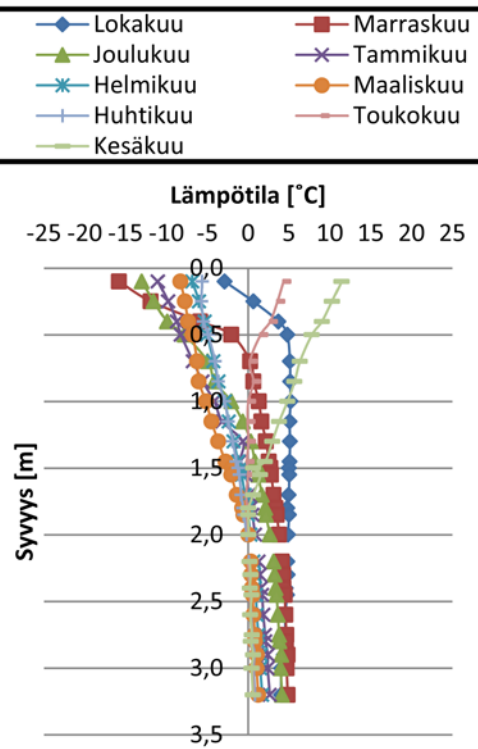
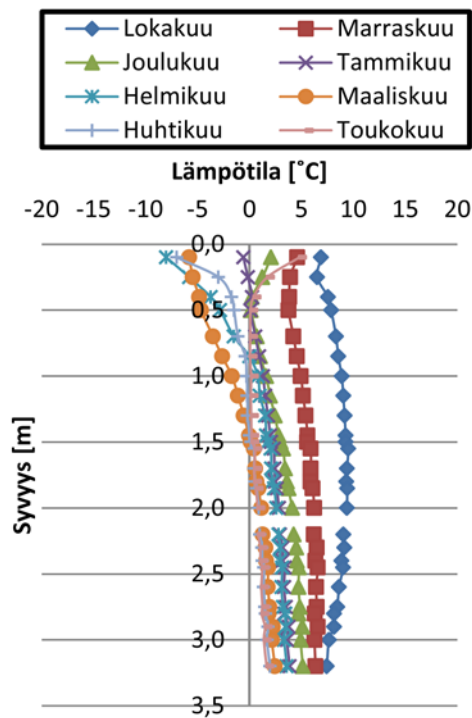


TOR 909 lämpötilaprofiili 2010-2011

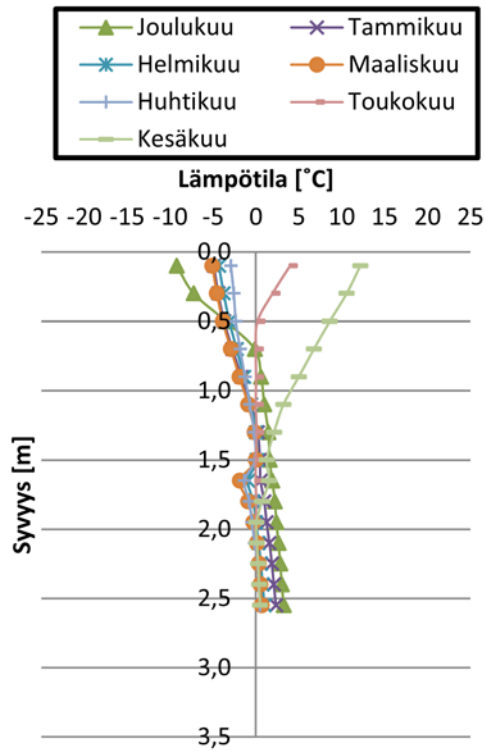


TOR 909 lämpötilaprofiili 2011-2012

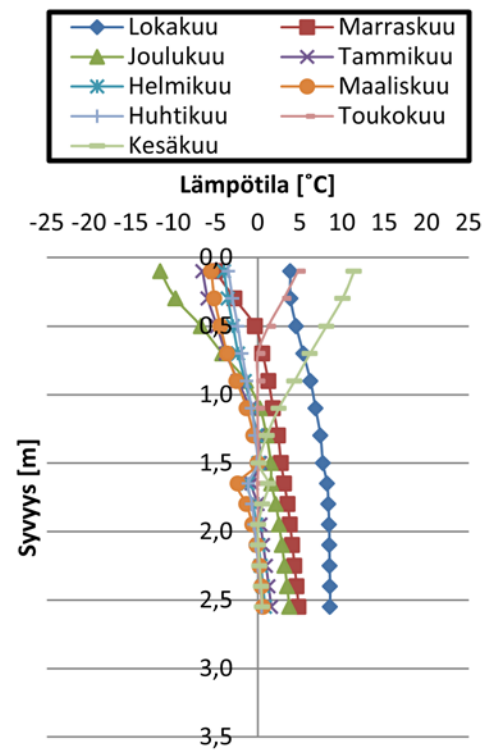


**TOR 921 lämpötilaprofiili
2009-2010****TOR 921 lämpötilaprofiili
2010-2011****TOR 921 lämpötilaprofiili
2011-2012**

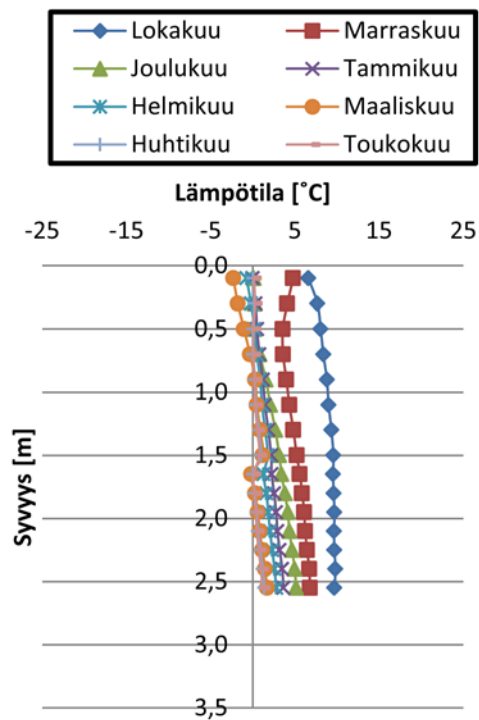
TOR 925 lämpötilaprofiili 2009-2010



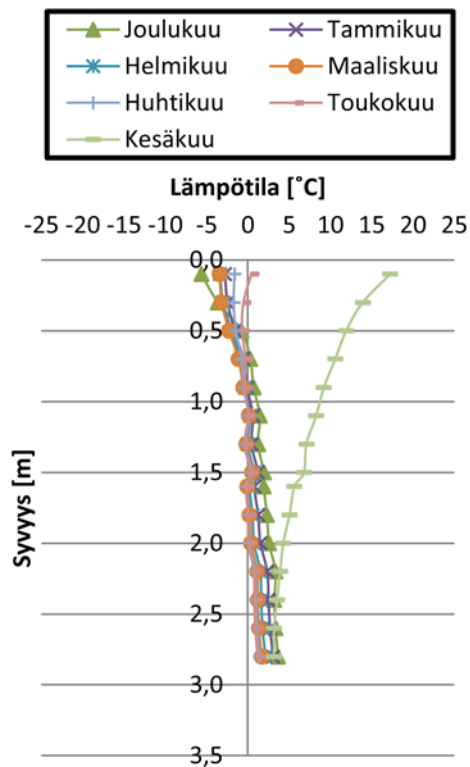
TOR 925 lämpötilaprofiili 2010-2011



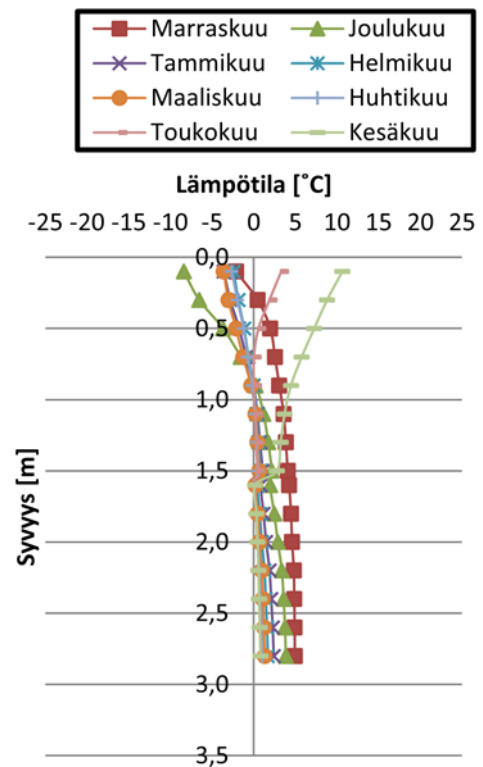
TOR 925 lämpötilaprofiili 2011-2012



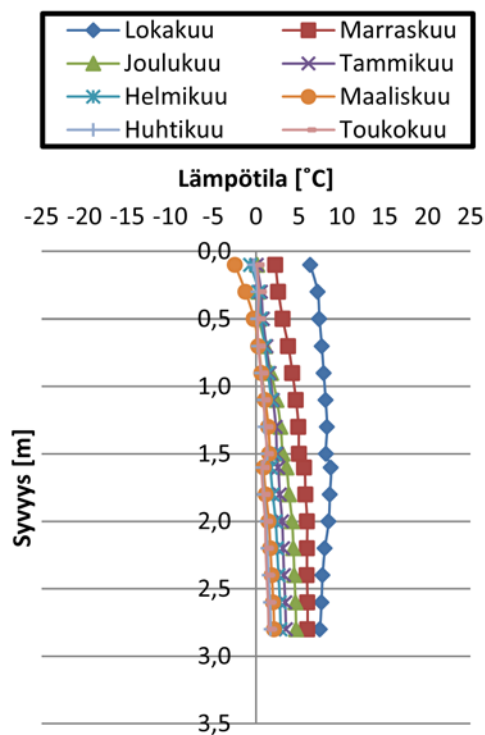
TOR 932 lämpötilaprofiili 2009-2010



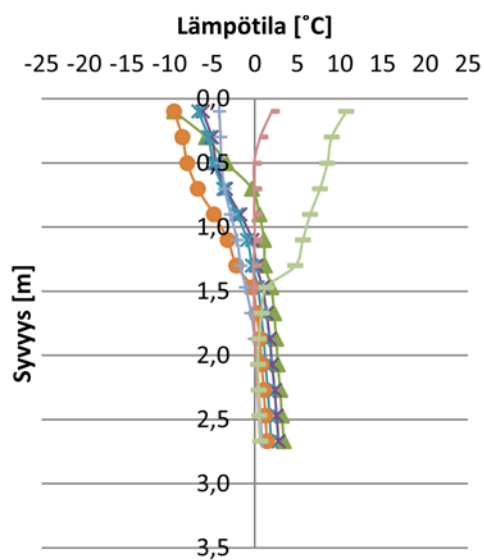
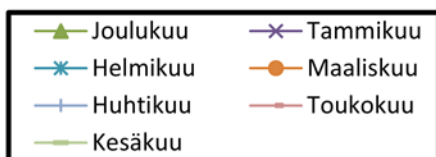
TOR 932 lämpötilaprofiili 2010-2011



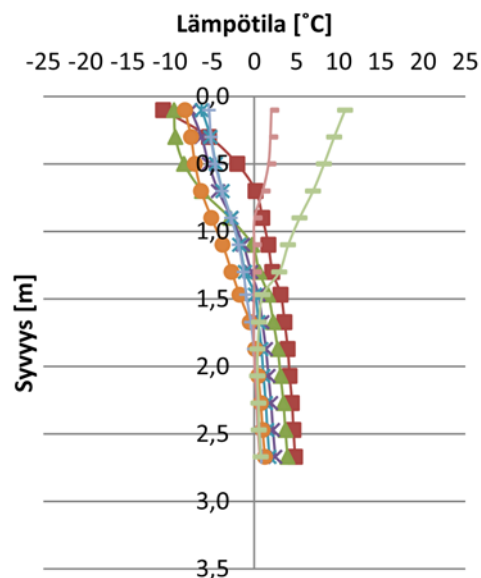
TOR 932 lämpötilaprofiili 2011-2012



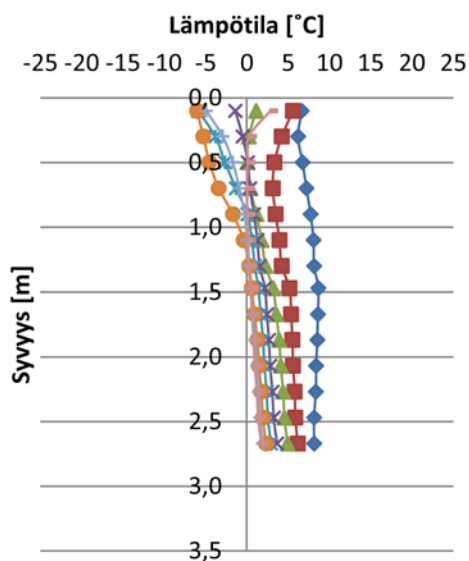
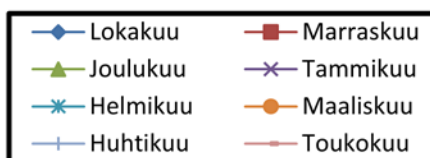
TOR 945 lämpötilaprofiili 2009-2010



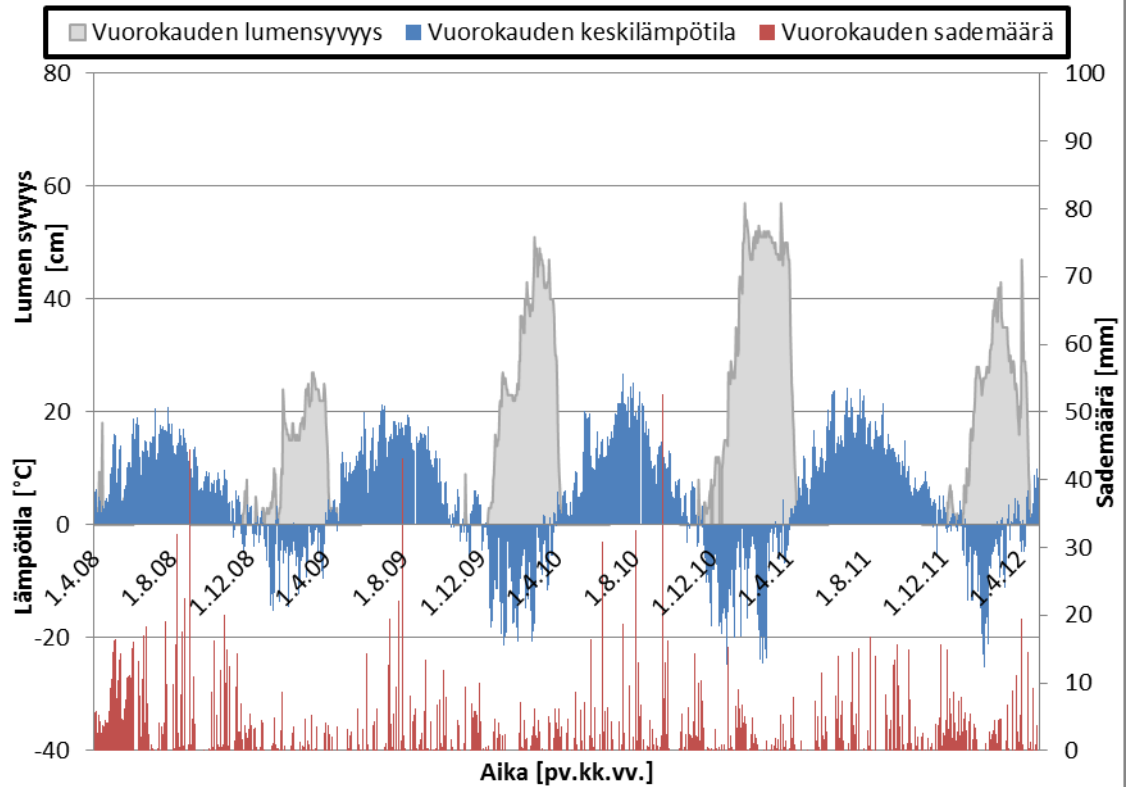
TOR 945 lämpötilaprofiili 2010-2011



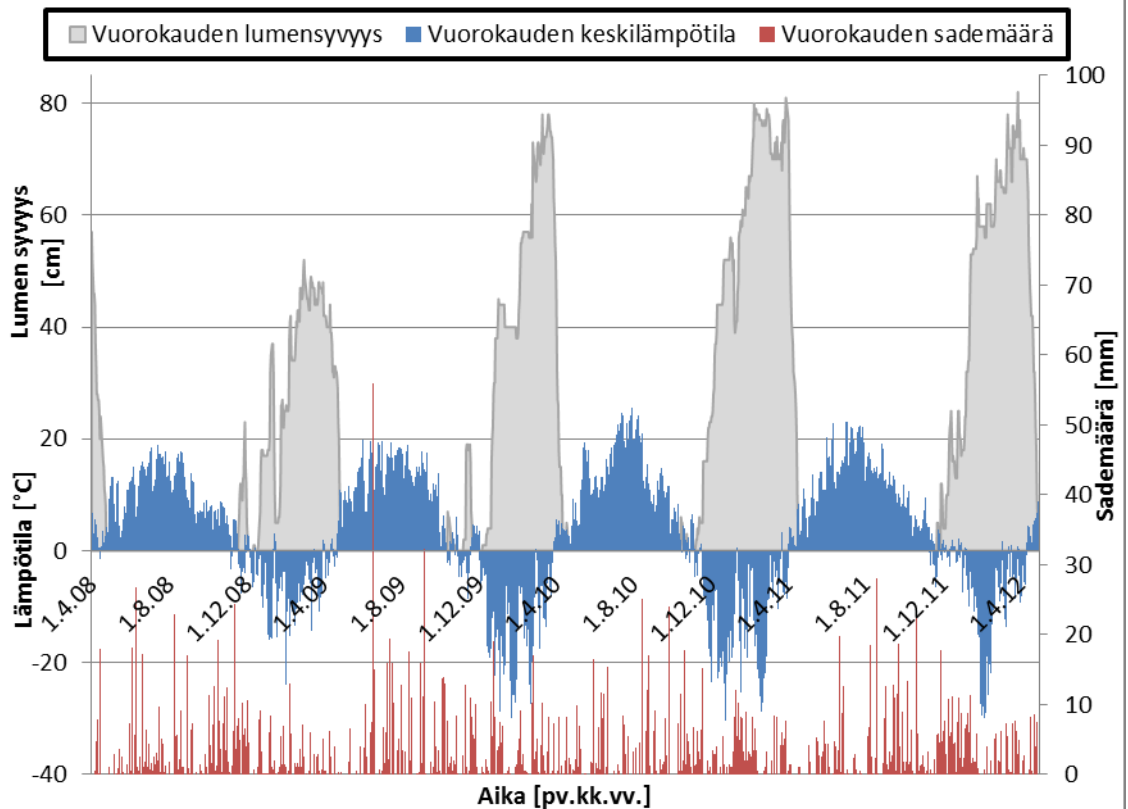
TOR 945 lämpötilaprofiili 2011-2012



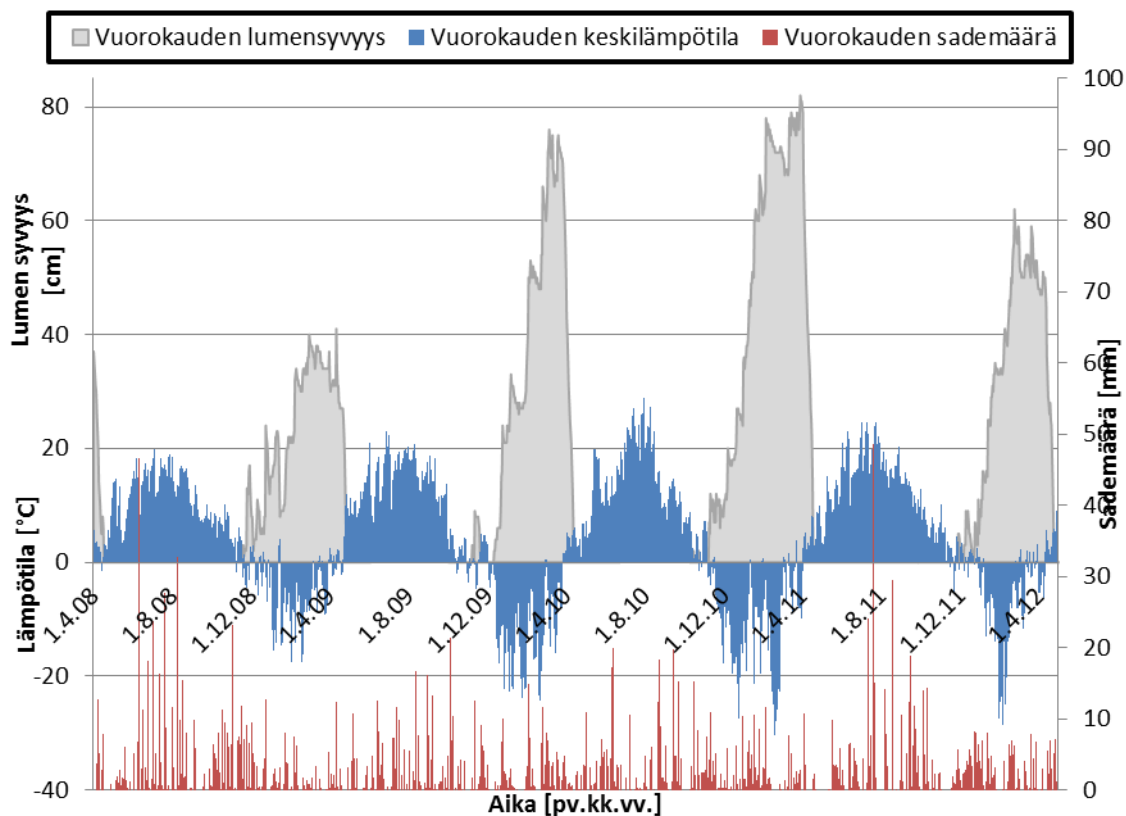
Karkku & Viiala säähavainnot



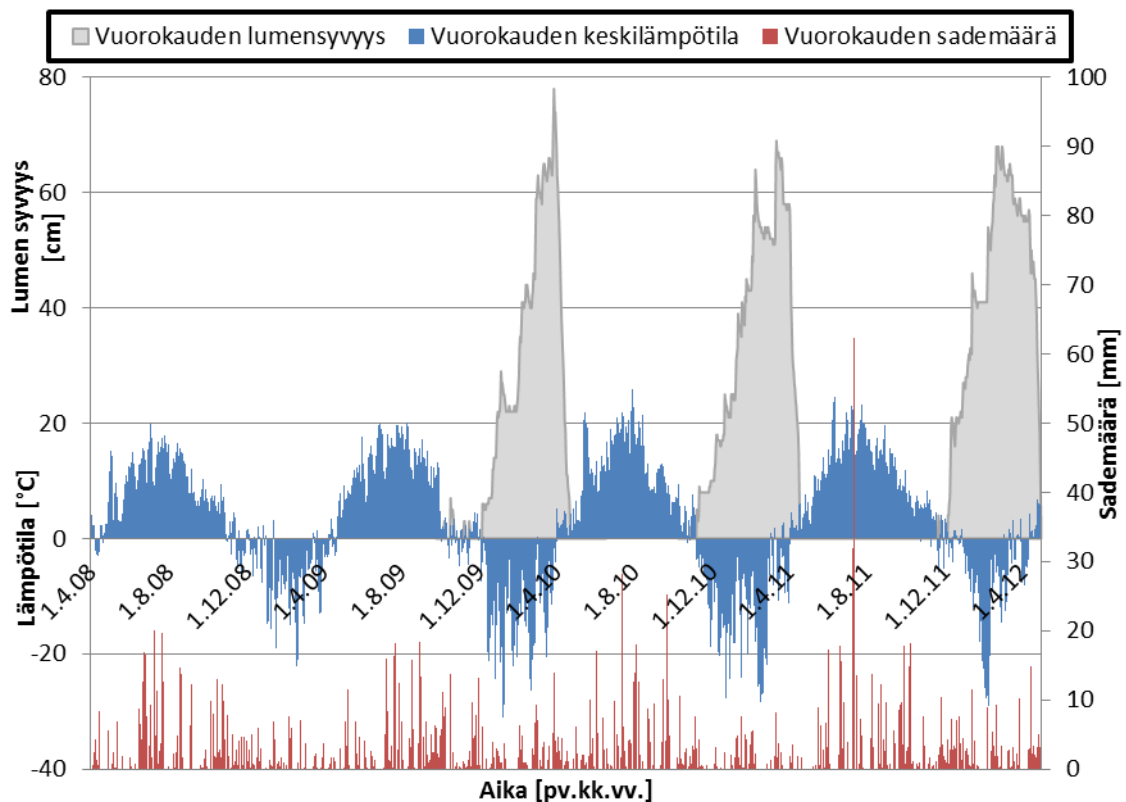
Kitee säähavainnot



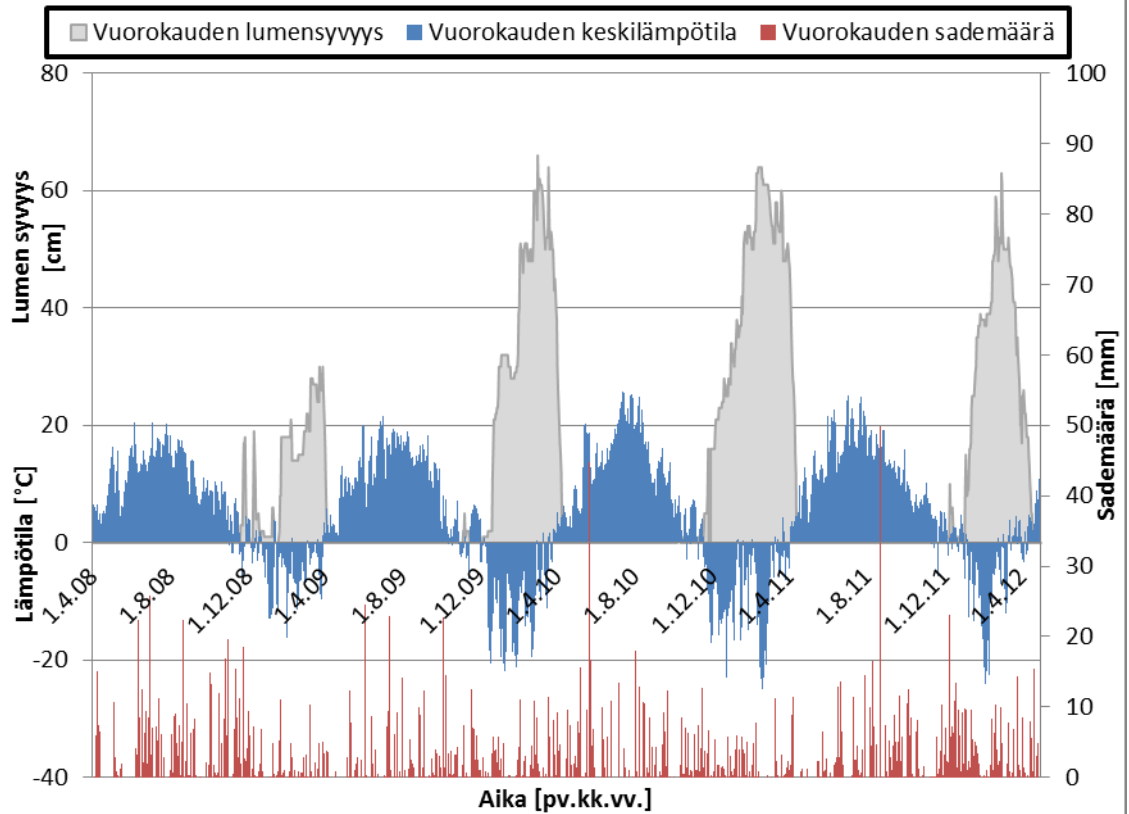
Kuopio säähavainnot



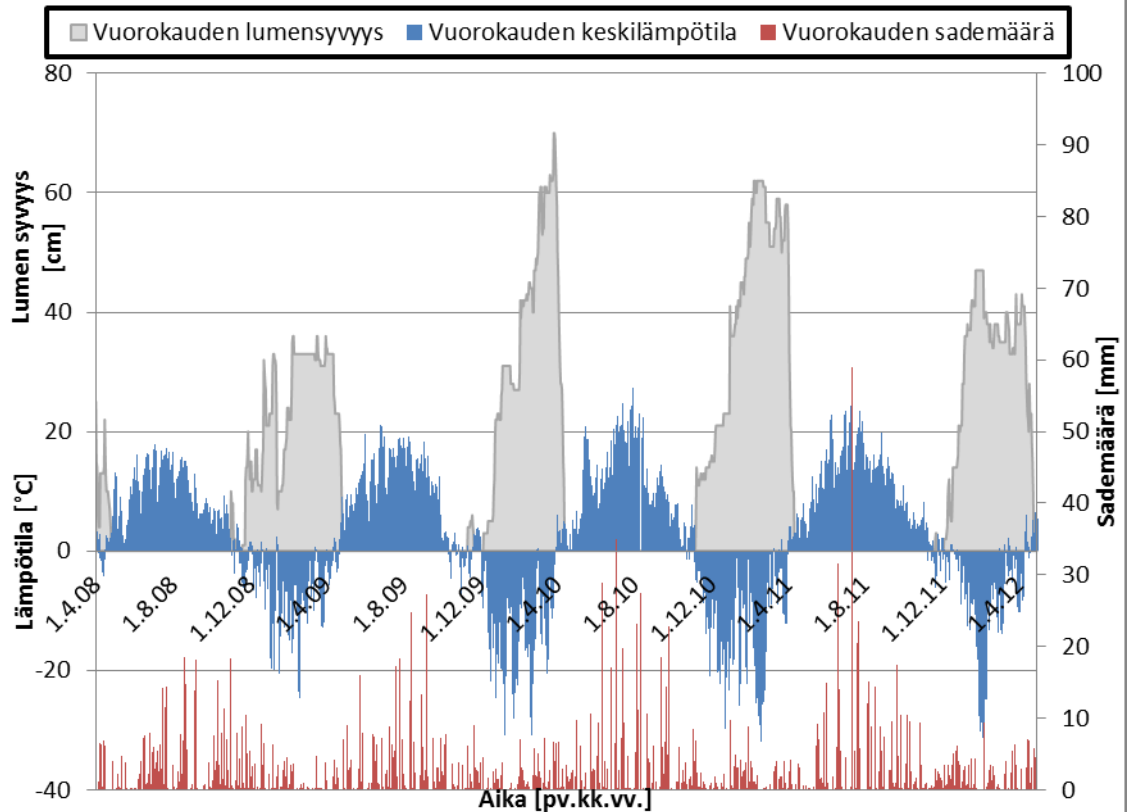
Liminka säähavainnot



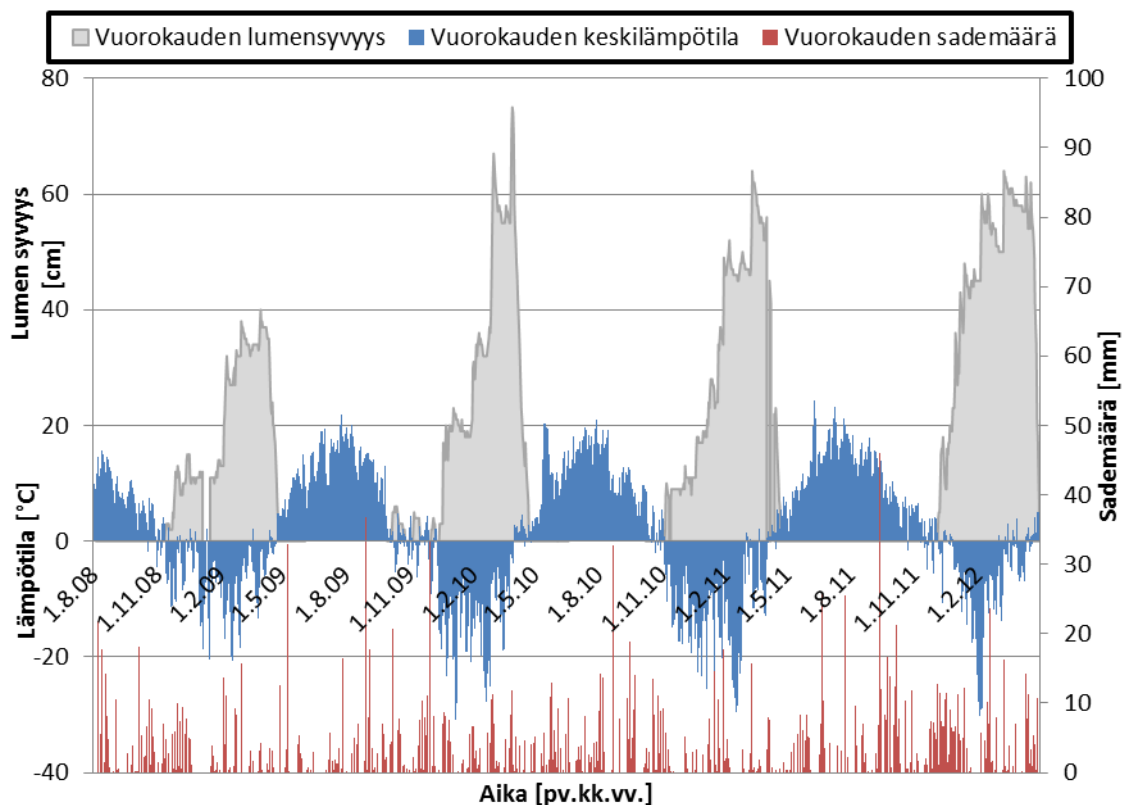
Mäntsälä säähavainnot



Paltamo säähavainnot



Tornion kohteet säähavainnot



Varkaus säähavainnot

